

ВЛИЯНИЕ ДНА НА ФОРМИРОВАНИЕ ЗВУКОВОГО ПОЛЯ НА ШЕЛЬФЕ (ПО РЕЗУЛЬТАТАМ ЭКСПЕРИМЕНТА)

Л. Н. ЗАМАРЕНОВА, М. И. СКИПА

*Отделение гидроакустики Морского гидрофизического института
НАН Украины, г. Одесса*

The difference of sound propagation power loss received experimentally in negative refraction conditions on the shelf with various geological structure of the sea bottom is shown. The probable loss mechanisms connected with the difference of bottom acoustic features along the hydroacoustic lines are considered.

ВВЕДЕНИЕ

Развитие украинской экономики связано с освоением сырьевых ресурсов, информационного пространства шельфа Черного моря, и инструментом решения этих задач являются акустические технологии. Специфика распространения сигналов в мелководных районах состоит в больших потерях энергии и зависимости этих потерь от гидрологических условий и свойств дна. И потери энергии при распространении сигналов, и пространственная структура звукового поля, столь важные при создании, к примеру, подводных информационных сетей, различны для разных районов шельфа Мирового океана [1]. Акустика шельфа Черного моря освещена в литературе в области формирования акустических полей в различных условиях [2], некоторых вопросов построения акустической модели акватории и адекватности ее реальным условиям распространения звука [3, 4], исследования особенностей нижней границы [5], построения геоакустических моделей [6, 7] и развития структурно-акустических моделей дна [8]. В целом акватория шельфа данными о гидрологических условиях, литологическом составе и стратификации донных отложений обеспечена. В акустических экспериментах получить данные *in situ* о гидрологических условиях не составляет проблемы, о свойствах дна – проблематично, а литературные и картографические данные дают обобщенную оценку его свойств. Дно даже небольшой акватории шельфа отличается вариациями литологического состава и стратификации донных отложений [7]. Вариации свойств дна ограничивают возможности численного моделирования звукового поля из-за априорной неопределенности граничных условий и сложности решения аналитико-численной задачи [9]. Оценка характеристик акустического поля в реальных условиях распространения звука может быть получена по результатам экспериментальных исследований, которые позволяют оценить роль ряда факторов в потерях энергии при распространении звука, связанных со структурой дна, выбрать гидроакустические трассы с наименьшими потерями энергии. Интересам развития акустических технологий и служит анализ результатов эксперимента.

Настоящая работа является продолжением исследований звукового поля, полученных экспериментально Отделением гидроакустики МГИ НАНУ. Целью ее является анализ возможных механизмов влияния дна на характеристики звукового поля в условиях отрицательной рефракции и интерпретация результатов с позиции теории мод.

СВОЙСТВА ДНА И ЗВУКОВОЕ ПОЛЕ НА ШЕЛЬФЕ

Основное влияние на формирование звукового поля на шельфе оказывают гидрологические условия, которые определяют тип рефракции звуковых волн. При отрицательной рефракции распространение звука происходит в придонном звуковом канале с большими потерями энергии, в этом случае определяющими факторами формирования звукового поля становятся свойства дна. Рассмотрим экспериментальные данные о звуковом поле, полученные в условиях придонного звукового канала на двух гидроакустических трассах, имеющих общую начальную точку, т.е. расположенных в одной акватории. Корректность сравнения зависимостей звукового давления от расстояния, $p(r)$, достигается за счет небольшого интервала времени между сканированием трасс и их фиксированного направления. Частота излучаемого сигнала – 516 Гц, длина волны – $\lambda \approx 2,9$ м, глубина излучателя, выраженная в единицах длины волны, – $z_s \approx 2\lambda$, волновая толщина водного слоя – $H \approx 5\lambda$.

Во время эксперимента геологические исследования не проводились. Вертикальную структуру и состав донных отложений для двух трасс оценим по опорным геологическим разрезам и работам [6, 7, 10], границы слоев и их литологический состав на полученных геологических разрезах, соответствующих трассам распространения звука, являются предполагаемыми. Для разрезов общими подстилающими слоями являются слои суглинков и песков мелкозернистых. Различие вертикальной структуры дна состоит в двух верхних слоях, один из которых является первым для одного разреза и вторым для другого. Это слои переменной мощности – ракушечников (скорость продольных волн $c_l = (1500-1648) \text{ м} \cdot \text{с}^{-1}$, плотность $\rho = (1,6-1,8) \cdot 10^3 \text{ кг} \cdot \text{м}^{-3}$) и илов мелкоалевритовых с раковинно-детритовым материалом ($c_l = 1470 \text{ м} \cdot \text{с}^{-1}$, $\rho = (1,38-1,60) \cdot 10^3 \text{ кг} \cdot \text{м}^{-3}$). Обозначим трассы и геологические разрезы по типу отложений их верхнего слоя – тип дна «Ракушечники» и тип дна «Илы». Полученные разрезы подтверждают прерывистость залегания, нерегулярность границ и локальность отложений [7].

Рассмотрим зависимости звукового давления от расстояния, $p(r)$, на двух гидрофонах в верхней и нижней части водного слоя, $z_r \approx 1,7\lambda$ и $z_r \approx 4,2\lambda$, рис. 1а, 2а. На рис. 1б, 2б показаны соответствующие трассам геологические разрезы. Вертикальное распределение нормированных собственных функций $|W_l|$ (где $l = \overline{1, 5}$ – номер моды) для наблюдавшихся во время эксперимента гидрологических условий в случае аппроксимации дна жидким однородным поглощающим полупространством показано на рис. 3. Амплитуды всех мод вблизи дна значительны, в результате все моды должны испытывать влияние дна. В таблице приведены периоды интерференции мод с номером i и j – $\Lambda_{i,j}$. Граничные условия входят в краевую задачу Штурма-Лиувилля в виде импеданса дна, поэтому приведенные характеристики мод могут отличаться от тех, которые соответствовали бы более реалистичной модели дна.

На начальном участке трасс, до расстояния ~ 2 км, отличия уровней звукового поля малы, а пространственные изменения близки к периоду интерференции первой и второй моды, $\Lambda_{1,2}$. Рис. 1а, 2а показывают, что на больших расстояниях различия $p(r)$ в зависимости от типа дна и горизонта приема становятся очевидными. Такое различие

характеристик звукового поля на близких по положению трассах в условиях придонного звукового канала может быть обусловлено следующими причинами:

- изменением глубины моря;
- различием литологического состава и стратификации осадочных отложений;
- неровностями нижней границы.

Общим свойством зависимостей $p(r)$ на обеих трассах является большие потери звуковой энергии и интерференционная структура. Однако степень затухания уровня звукового поля и его пространственная структура на трассах различны. Обращают на себя внимание более высокие потери при распространении звука на трассе с типом дна «Ракушечники». Результаты измерений говорят о таком различии и для других горизонтов приема (здесь не приведенных). Рассмотрим возможное влияние перечисленных выше факторов, каждого отдельно, на особенности зависимостей $p(r)$ на трассах.

Оценим влияние изменения глубины моря. Изменение глубины вдоль трассы нарушает условие параллельности границ волновода. Согласно эксперименту, более высокими являются потери энергии на трассе с типом дна «Ракушечники», однако границы ее плоскопараллельны (рис. 2). Для трассы с типом дна «Илы» геометрия границ иная, на расстоянии от 2 до 6 км глубина моря возрастает на величину $\sim \lambda$ (рис. 1б), где плоскопараллельные границы начального участка трассы переходят в клин. Обратимся к трактовке звукового поля в переменном по трассе волноводе Л.М. Бреховских и Ю.П. Лысанова [11]. В случае наклонного дна связь между модами может осуществляться через граничные условия, однако, в данном случае по экспериментальным данным для трассы с клином изменения периодов интерференции не наблюдается (рис. 1а). Отметим, что в экспериментах, выполненных в Средиземном море в условиях постоянной скорости звука в водном слое, при изменении по трассе характера дна от жесткого до илистого, наблюдалось уменьшение потерь над склоном (распространение в сторону понижения дна) [9]. Здесь же уменьшения потерь над склоном не наблюдается (рис. 1а) при таком же направлении распространения, но и изменение глубины (приведенное к длине волны) на этой трассе было почти в 30 раз меньше, чем в районе исследований в Средиземном море [9]. В другом эксперименте, тоже при крутом склоне, потери при распространении с шельфа к глубокой воде возрастали [12]. Если обратиться к лучевому инварианту для клина при постоянном отрицательном градиенте скорости звука [11], то, начиная с некоторого расстояния, ниже поверхности моря должна появляться зона тени, линия границы которой параллельна линии клина. Однако в данном эксперименте для глубины приема $z_r \approx 1,7\lambda$ повышения потерь в конце трассы не наблюдается, что можно было бы ожидать для клина. По-видимому, результаты эксперимента не свидетельствуют о влиянии изменения глубины волновода такого порядка на звуковое поле.

Обратимся к вопросу влияния состава донных отложений. Экспериментальные исследования свидетельствуют, что потери при распространении звука на трассах различны (рис. 1а, 2а). Рассмотрим отличие акустических свойств дна на двух трассах и их влияние на звуковое поле в водном слое.

В илах мелкоалевритовых, которые составляют верхний слой на трассе с типом дна «Илы», сдвиговые волны отсутствуют. Особенность этой границы заключается в том, что скорость продольных волн в илах может быть меньше скорости звука в водном слое вблизи дна [5]. Однако положительный градиент скорости звука в осадочном слое (иногда составляющий $(1-3) c^{-1}$ на северо-западном шельфе [6]) приводит к тому, что эффективная скорость звука в слое осадков становится больше скорости звука в водном

слое вблизи дна [13]. Если же градиент скорости звука в осадочном слое близок нулю, то в зависимости от частоты два слоя, водный и осадочный, ведут себя, либо как единое целое, либо как два парциальных волновода [13]. Учитывая изложенное выше, можно заключить, что в условиях приводимого здесь эксперимента скорость продольных волн в илах могла быть выше, чем в водном слое вблизи дна, или ниже, но при этом градиент скорости звука в слое осадков был положительным. Это подтверждает интерференционная структура на трассе с типом дна «Илы», которая сохраняется во всем диапазоне расстояний для обеих глубин приема с основным периодом, близким $\sim \Lambda_{1,2}$ (рис. 1а). Интерференция мод более высоких номеров наблюдается только в начале трассы.

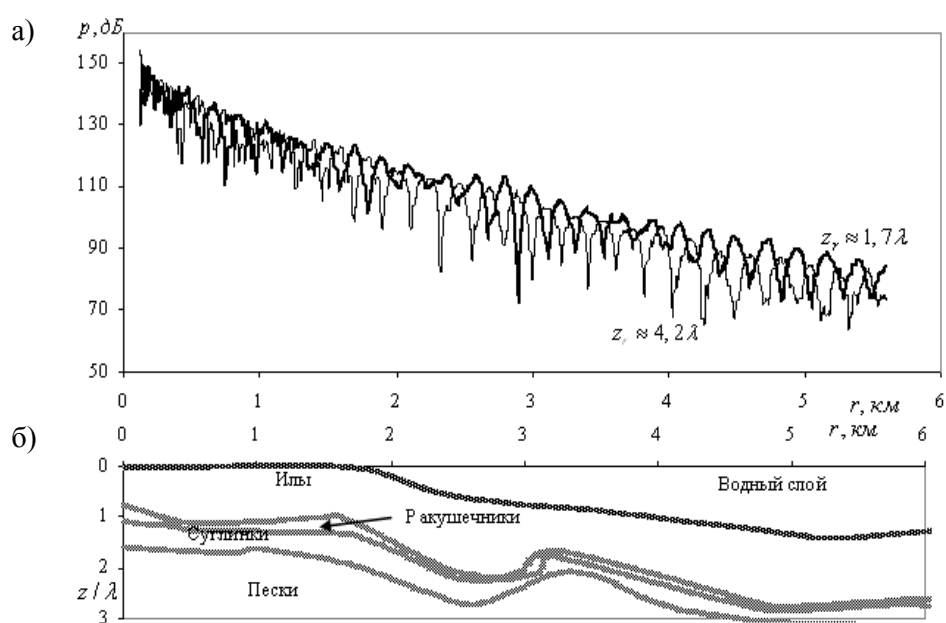


Рис. 1

На другой трассе верхний слой осадков составляют ракушечники (рис. 2). Причиной повышенных потерь на трассе с типом дна «Ракушечники» может являться то, что увеличение скорости продольных волн в этом материале приводит к увеличению жесткости скелета дна и связанному с этим возбуждению сдвиговых волн и дополнительному поглощению энергии. Вообще раковинно-детритовый материал нарушает взаимосвязь физико-механических свойств осадков и представляет собой основной фактор изменчивости их свойств [6]. Зафиксированные скорости сдвиговых волн в осадках северо-западного шельфа составляют $(188-205) \text{ м} \cdot \text{с}^{-1}$ [6]. Таким образом, физические свойства верхнего слоя осадочных отложений, представленного ракушечниками, можно рассматривать как наиболее вероятный механизм повышенных потерь энергии звуковых волн. Учитывая небольшую мощность этого осадочного слоя, можно предполагать и возможность выхода на поверхность нижележащего слоя илов мелкоалевритовых, что может являться еще одной причиной повышенных потерь энергии на этой трассе, связанной с взаимодействием мод. Рассмотрим интерференционную структуру поля на этой трассе (рис. 2а). Основной период изменения звукового давления также можно связать с интерференцией первых двух мод, $\Lambda_{1,2}$. При глубине приемника

$z_r \approx 1,7\lambda$ малые периоды (вероятно, $\Lambda_{1,3}$ и $\Lambda_{2,4}$) накладываются на основной период только в начале и конце трассы. Более сложна интерференционная структура вблизи дна, $z_r \approx 4,2\lambda$. Основной период, близкий $\Lambda_{1,2}$, выделяется и здесь, однако он глубоко изрезан во всем диапазоне расстояний. По-видимому, эти малые периоды связаны с интерференцией третьей моды с первой, $\Lambda_{1,3}$, второй, $\Lambda_{2,3}$, и четвертой, $\Lambda_{3,4}$, модой. Возможно, что и с интерференцией четвертой моды со второй, $\Lambda_{2,4}$, и пятой, $\Lambda_{4,5}$. Таким образом, звуковое поле вблизи дна имеет богатый модальный состав. Уровни звукового давления здесь больше, чем для приемника, расположенного выше. В то же время, если судить по рис. 3, в точке приема амплитуды третьей и особенно четвертой моды малы. Этот результат заставляет снова обратиться к предположению о взаимодействии мод на трассе с типом дна «Ракушечники», связанного с изменением состава верхнего слоя донных отложений – локальным замещением слоя ракушечников слоем илов.

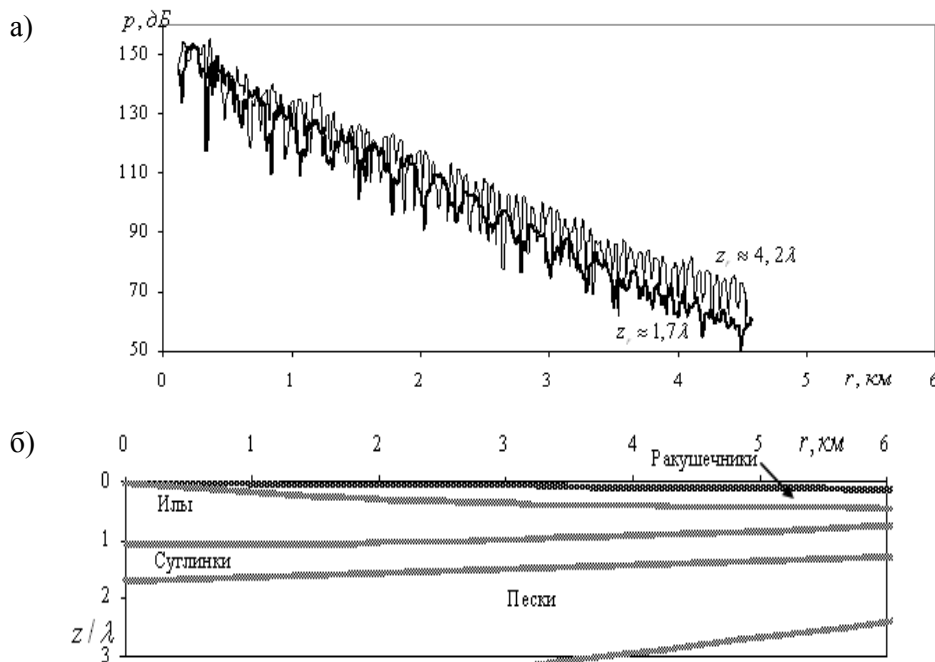


Рис. 2

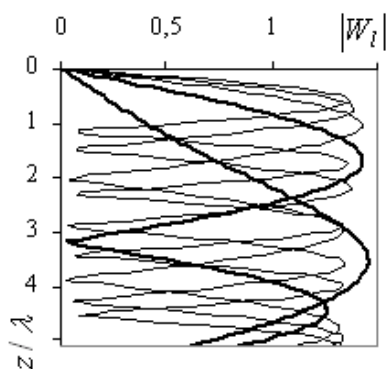


Рис. 3

Таблица

i	$\Lambda_{i,j}, m$				
	j				
	2	3	4	5	6
1	214	87	47	29	19
2	–	147	60	33	21
3	–	–	100	43	25
4	–	–	–	75	33
5	–	–	–	–	59

Наконец, дополнительные потери при распространении звука может вызвать рассеяние на шероховатой поверхности дна. Неровности на поверхности слоя илов неопределенны, но более вероятны на поверхности слоя ракушечников.

Таким образом, анализ характеристик звукового поля и геологических разрезов показал, что наиболее вероятными причинами различий потерь при распространении звука на двух трассах является различие состава осадочных слоев и его изменчивость с расстоянием. Следует признать, что недостатки геоакустических моделей дна являются не единственной причиной трудностей интерпретации повышенных потерь при распространении звука на шельфе в условиях отрицательной рефракции, полученных экспериментально. Механизмы затухания звука в осадочных слоях по-прежнему остаются дискуссионными, остается и возможность существования дополнительных механизмов потерь в донном пространстве, не учитываемых существующими теориями [9].

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

- Показана изменчивость структуры звукового поля в условиях отрицательной рефракции в пределах небольшой акватории и связь этой изменчивости со свойствами дна.
- Наиболее вероятной причиной повышенных потерь при распространении звука на трассе с типом дна «Ракушечники» является возбуждение сдвиговых волн и локальное замещение осадков верхнего слоя илами.
- Результаты свидетельствуют о необходимости уточнения граничных условий для краевых задач акустики шельфа Черного моря и математического моделирования этих задач с учетом структуры дна в виде жидких и жидко-упругих слоев.

ЛИТЕРАТУРА

1. M. Sozer, M. Stojanovic, J.G. Proakis. Underwater acoustic networks // IEEE J. Oceanic Eng. – 2000. – 25, 1. – 72-82.
2. Дивизинюк М.М. Акустические поля Черного моря – Севастополь: Госокеанариум, 1998. – 352 с.
3. Л.Н. Замаренова, М.И. Скипа. Акустическая модель квазистационарных трасс. Часть 1 Концепция исследований // Гидроакустический журнал (Проблемы, методы и средства исследований Мирового океана): Сб. науч. тр. Запорожье: НТЦ ПАС НАН Украины. – 2009. – №6. – С. 10–23.
4. Л.Н. Замаренова, М.И. Скипа. Акустическая модель квазистационарных трасс. Часть 2 Оценка физической адекватности акустической модели // Гидроакустический журнал (Проблемы, методы и средства исследований Мирового океана): Сб. науч. тр. Запорожье: НТЦ ПАС НАН Украины. – 2010. – №7. – С. 58–72.
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 // Мор. гидрофиз. журн. – 2003. – № 5. – С. 40–46.
6. Наумов И.В. Геоакустическая модель донных осадков Каркинитского залива (Черное море) // Вопросы судостр. Сер. Акустика – 1980. – вып. 14. – С. 79–83.

7. А.В. Ильин. О геологических моделях дна в акустике океана / Акустические волны в океане. Под ред. Л.М. Бреховских, И.Б. Андреевой – М.: Наука, 1987– С. 130–137.
8. А.И. Гончар, С.И. Донченко, Л.И. Шлычек, А.И. Шундель. Синтез структурно-акустических моделей морского дна // Консонанс – 2005, Акустический симпозиум 27-29 сентября 2005 г., г. Киев – Сб. тр. – 2005. – С. 142–152.
9. М.К. Ферла, Дж. Дрейни, Ф.Б. Енсен, У.А. Куперман. Сравнение полученных в широкой полосе результатов расчета и экспериментальных данных по распространению звука в прибрежных водах / Акустика дна океана. Под ред. У. Купермана, Ф. Енсена – М.: Мир, 1984. – С. 384–398.
10. Черное море. Сборник – Л.: Гидрометеиздат, 1983. – 407 с.
11. Л.М. Бреховских, Ю.П. Лысанов. Теоретические основы акустики океана – Л.: Гидрометеиздат, 1982. – С. 264.
12. Т. Эйгал. Влияние морского дна на распространение звука в мелкой воде / Акустика дна океана. Под ред. У. Купермана, Ф. Енсена – М.: Мир, 1984. – С. 366–383.
13. Н.С. Агеева, В.Д. Крупин. Особенности модовой структуры поля в слоистом волноводе при скорости звука в верхнем слое дна, равной и меньшей скорости звука в воде / Акустика океанской среды. Под ред. Л.М. Бреховских, И.Б. Андреевой – М.: Наука, 1989. – С. 19–27.