

УДК 534.23; 534.4; 551.463.284

АКУСТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ КВАЗИСТАЦИОНАРНЫХ ТРАСС Часть 1 КОНЦЕПЦИЯ ИССЛЕДОВАНИЙ

© 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 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 дослідженням звукового поля на шельфе северо-западной части Черного моря предложена акустическая модель квазистационарных трасс. В первой части работы 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. 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

Черное море является объектом всесторонних исследований в области акустики, в последнее время возрос интерес и к акустике принадлежащего Украине шельфа в связи с перспективностью использования его ресурсов и актуальностью экологической безопасности среды. Как акустический мониторинг среды, так и гидроакустический канал передачи информации в решении задач освоения ресурсов, контроля экологии шельфовых акваторий не имеют альтернативы. Обращаясь к прикладным задачам и рассматривая задачи телеметрии как классические, остановимся на проблемах акустического мониторинга шельфовых акваторий. Метод томографии, в основе которого лежит измерение времени распространения сигналов, для условий мелкого моря имеет ряд принципиальных трудностей, обусловленных неполным рангом ядра матрицы возмущений времени распространения [1–3]. Отмечаются и перспективы практической реализации акустического мониторинга шельфовых акваторий Мирового океана [4]. Возможности акустического мониторинга Черного моря, в основном, рассматриваются для глубоководных акваторий [5–8]. В настоящее время объектом систематических экспериментальных исследований является только шельф Восточной части Черного моря, вблизи г. Геленджика, где экспериментально апробированы методы акустического мониторинга [9, 10]. Прикладные задачи акустики шельфовых акваторий имеют общее свойство – они связаны со специфическими условиями распространения звука в мелком море на региональном уровне. Шельфовая акватория уникальна в отношении как стратификации вод, так и геологической структуры дна. Разнообразны условия распространения звука – от подводного звукового канала (Балтийское море) до придонного звукового канала (шельф северо-западной части

Чорного моря). Границы волновода могут быть как плоскопараллельными (шельф северо-западной части Черного моря), так и зависимыми от расстояния (шельф Охотского моря). Различны стратификация, состав и свойства осадочных слоев – от водонасыщенных и газонасыщенных алевритовых фракций со скоростью продольных волн, меньшей скорости звука в придонном слое воды (некоторые районы шельфа северо-западной части Черного моря), до консолидированных осадков с поперечной скоростью звука (Мексиканский залив). Экспериментальные данные о распространении звука, гидролого-акустическая и геоакустическая модели, теоретическое описание звукового поля становятся частью решения прикладных задач акустики мелководных районов и служат основой для оценки уровня сигналов, выбора оптимальных расстояний между трансиверами, глубин их размещения, трасс распространения звука.

Наиболее полно освещены вопросы распространения звука в подводном звуковом канале Черного моря [11–14] и проблемы акустики его шельфовых районов в серии работ М.М. Дивизинюка, но только с точки зрения лучевой акустики в приложении к задачам гидролокации (отметим работу [15]). Также в рамках лучевой акустики рассмотрены вопросы распространения звука в приповерхностном подводном звуковом канале шельфа северо-западной части Черного моря (СЗЧМ) [7]. Достаточно хорошо исследованы проблемы акустики дна Черного моря – глубоководных районов [16] и шельфа [17–19]. Однако, целостное рассмотрение экспериментальных данных и акустической модели акватории не получили отражения в литературе, что, впрочем, относится и к другим акваториям Мирового океана. Исключение составляет Баренцево море, для которого создана акустическая модель, обеспечивающая прогностические оценки характеристик звукового поля при ожидаемом освоении Штокмановского газового месторождения [20].

Таким образом, решение актуальных прикладных задач шельфа приближается к практической реализации и приводит к необходимости всесторонней акустической характеристики акватории на региональном уровне. Практическое значение и актуальность данной работы определяются как дефицитом экспериментальных данных о характеристиках звуковых полей, так и отсутствием концептуального подхода к акустическим исследованиям украинского шельфа Черного моря, востребованностью этой информации для задач акустического мониторинга среды и телеметрии. Отделением гидроакустики МГИ НАН Украины в течение ряда лет проводились экспериментальные и теоретические исследования звукового поля в одном из шельфовых районов СЗЧМ. Целью работы является создание акустической модели квазистационарных трасс, оценка ее физической адекватности в условиях отрицательной, а также положительной рефракции и квазиоднородного водного слоя на основе концептуального подхода к исследованиям звукового поля и использования информационной базы результатов экспериментов.

Работа состоит из двух частей. Первая часть включает два раздела. В разделе 1 представлена концепция и методика исследований, в разделе 2 – описание акустической модели квазистационарных трасс. Вторая часть работы, которая будет напечатана в следующем номере Гидроакустического журнала, содержит раздел 3 и заключение. В разделе 3 дана оценка физической адекватности акустической модели квазистационарных трасс. Результаты изложены в заключении.

1 Концепция и методика экспериментальных исследований

Концепция исследований звукового поля на шельфе СЗЧМ базируется на системном подходе к акустической характеристике акватории [20] и имеет следующие составляющие:

- проведение экспериментальных исследований звукового поля на квазистационарных гидроакустических трассах, разработка методики измерений;
- создание акустической модели квазистационарных трасс;
- оценка физической адекватности акустической модели трасс.

Экспериментальные исследования основаны на проведении измерений на квазистационарных гидроакустических трассах, которые обеспечивают возможность сравнения результатов измерений и численного моделирования [11]. В контексте нашей концепции исследований квазистационарная трасса – это акустическая трасса с фиксированными координатами, с одной стороны которой приемная антенна устанавливалась стационарно, а излучатель, находившийся на борту судна, устанавливался либо стационарно в фиксированных точках вдоль трассы – по одной методике, либо буксировался с целью сканирования трассы – по другой.

Выбор акватории, прилегающей с морской стороны к острову Гендра, обусловлен условиями распространения звука, типичными для шельфовых районов СЗЧМ – формированием стратификации вод, близостью гидрофронтальной зоны, закономерностями осадконакопления. Были выбраны две трассы, точка пересечения которых находилась на глубине ~15 м, где была стационарно установлена приемная антенна, что обеспечивало прием сигналов на фоне естественных шумов моря. Положение трасс, показанное на рис. 1.1, было выбрано исходя из различия условий формирования стратификации вод и процессов осадконакопления в широтном и меридиональном направлении. Трасса №1 занимает положение, близкое к меридиональному положению, трасса №2 – близкое к широтному положению. Выбранные акустические трассы позволяли исследовать звуковое поле в условиях стратификации вод, типичной для шельфа СЗЧМ, благодаря которой формируется либо приповерхностный звуковой канал и квазиоднородный слой, либо придонный звуковой канал. Проводился мониторинг поля скорости звука (по измерениям температуры и солености) и гидрометеорологических условий.

Рассмотрим экспериментальную составляющую концепции исследований.

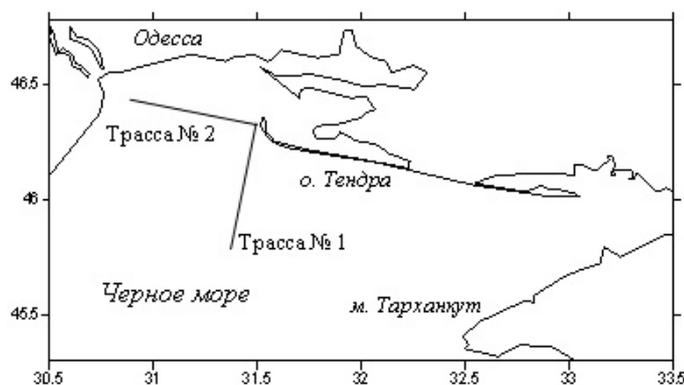


Рис. 1.1 – Положение трасс

В качестве зондирующего сигнала выбран непрерывный синусоидальный сигнал, исходя из необходимости сравнения экспериментальных данных с результатами теоретических расчетов. Частота сигнала, равная 516 Гц (основная резонансная частота излучателя), отвечала задаче исследования механизмов потерь звуковой энергии в дне.

Приемная антенна – это вертикальная база из ненаправленных, эквидистантно расположенных гидрофонов, расстояние между которыми составляло половину длины волны (~1.45 м). Ее вертикальный размер можно считать соизмеримым с толщиной водного слоя. Методика установки антенны обеспечивала минимизацию влияния поверхностного волнения, течений и смещений относительно дна на отклонение от вертикали при типичных для прибрежных районов СЗЧМ значениях скорости течений и высотах волн до 15 дм. Сигналы от антенны передавались по кабелю в береговую лабораторию, обеспечивался прием сигналов одновременно парой гидрофонов, коммутация которых производилась дистанционно.

Сопоставление расчетов для акустической модели квазистационарных трасс и результатов измерений требует получения как можно более точных экспериментальных данных об амплитудных и пространственных характеристиках звукового поля. В связи с этим были использованы две методики измерений, одна – основана на измерениях в фиксированных точках при стационарной установке излучателя, другая – на сканировании трассы с помощью буксируемого излучателя. Схема измерений показана на рис. 1.2.



Рис. 1.2 – Схема измерений

Методика измерений в фиксированных точках квазистационарной трассы использует стационарную установку излучателя (по методике установки антенны) – в фиксированных точках с борта находящегося на якорю судна. На заданном расстоянии от приемной антенны и заданной глубине излучателя проводилось излучение сигнала, который принимался парой гидрофонов и регистрировался. Затем регистрировались сигналы, принятые другой парой гидрофонов, и т.д. Затем излучатель стационарно устанавливался на следующей глубине, и вся серия измерений повторялась. Далее судно переходило в новую точку трассы, и проводился новый цикл измерений. Таким образом, регистрировались сигналы, принимаемые гидрофонами, на различных горизонтах, на разном расстоянии и глубине излучателя. Исходя из компромисса между протяженностью трассы, количеством фиксированных точек и длительностью измерений, исследования проводились на следующих расстояниях от приемной антенны: 0.2, 0.5, 1.0, 2.0, 3.0, 4.0, 5.0 и 7.0 км (в летний период – в дополнительных точках).

После предварительной обработки сигналы записывались на магнитограф, выделялись и вводились в ЭВМ их квадратурные составляющие, и рассчитывались текущие значения амплитуды сигналов $p_A(t_i)$. Исходя из ожидаемых значений периода амплитудных флуктуаций принимаемого сигнала (десятые доли герца), в качестве интервала усреднения N выбран интервал, равный 300 с. Средние значения амплитуды на заданном расстоянии,

$$\bar{p}_A = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N p_A(t_i). \quad (1.1)$$

Определялась аномалия распространения (значение отклонения уровня звукового давления в морской среде под влиянием рефракции от уровня звукового давления того же источника в однородной безграничной среде, p_0 , [21]) в виде:

$$A = 20 \lg \frac{\bar{p}_A}{p_0}. \quad (1.2)$$

Преимущество методики – высокая точность установки излучателя. Однако при протяженности трассы ~ 7 км и количестве точек, равном восьми, двух горизонтах излучения время измерений составляет несколько часов. Источниками методической погрешности измерений в фиксированных точках являются: погрешность оценки расстояния и глубины установки излучателя.

Методика сканирования трассы обеспечивает выполнение измерений в течение короткого промежутка времени – при протяженности трассы ~ 7 км и скорости судна ~ 2 м·с⁻¹ время измерений составляет менее одного часа. Целью ее использования являлось получение пространственной структуры звукового поля. Излучатель жестко крепился к буксируемому устройству, позволяющему буксировать его на глубине ~ 6 м (см. рис. 1.2). Судно проходило трассу, удаляясь от приемной антенны или приближаясь к ней с постоянной скоростью, буксируя излучатель, который непрерывно излучал сигналы. Осуществлялся прием сигналов подключаемой дистанционно парой гидрофонов, затем трасса сканировалась в противоположном направлении, производился прием сигналов следующей парой гидрофонов, и т.д. Весь цикл измерений повторялся для сканирования второй трассы. Предварительно обработанные принятые сигналы записывались на магнитограф. Выделялась огибающая сигнала, проводилась ее дискретизация, данные вводились в ЭВМ и усреднялись со скользящим средним, k -й отсчет огибающей имеет вид:

$$\bar{s}_k = \frac{1}{l} \sum_{i=k}^{l+k-1} s_i, \quad k = \overline{1, N}, \quad (1.3)$$

где s_i – i -й отсчет исходной записи;

l – интервал скользящего усреднения;

N – длина записи.

Интервал усреднения l был выбран равным 9, что при частоте дискретизации 2 Гц соответствует времени усреднения ~ 4 с. При скорости судна ~ 2 м·с⁻¹ это эквивалентно

усреднению по расстоянию с интервалом ~ 8 м, что меньше ожидаемых периодов интерференции звуковых волн. Усредненное звуковое давление нормировалось на величину $p' = 10^{-6}$ Па,

$$p(r) = 20 \lg \frac{\bar{p}(r)}{p'} . \quad (1.4)$$

Преимущество второй методики – получение зависимости звукового давления от расстояния вдоль всей трассы за короткий период времени. Методическая погрешность измерений методом сканирования трассы состоит из погрешности оценки расстояния из-за непостоянной скорости судна и глубины буксировки излучателя.

Общей для обеих методик является погрешность оценки глубины приемников и погрешность, связанная с различным рельефом дна и его акустических свойств во время сканирования трассы в противоположных направлениях.

2 Акустическая модель квазистационарных трасс

Основополагающими для акустической модели акватории являются гидролого-акустическая, геоакустическая модель и теоретическое описание звукового поля [20]. С этой точки зрения охарактеризуем акустическую модель квазистационарных трасс.

2.1 Гидролого-акустическая модель

Гидролого-акустическая модель акватории по существу представляет собой базу данных о поле скорости звука. Поскольку проблема задания вертикального распределения скорости звука в произвольном виде при расчете характеристик звукового поля отсутствует, гидролого-акустическая модель не требует специального рассмотрения. Однако некоторые особенности гидролого-акустической модели квазистационарных трасс отметим. Во-первых, отличие трасс состоит в том, что в летний гидрологический сезон трасса №2 лежит в области экстремального положения Днепр-Бугской гидрофонтальной зоны, а трасса №1 – лишь частично [22]. Во-вторых, экспериментальные исследования проводились в условиях наиболее и наименее благоприятных для распространения звука – это условия положительной рефракции и квазиоднородного слоя, а также отрицательной рефракции. Мониторинг вертикального распределения температуры и солености, по которым рассчитывалась скорость звука, осуществлялся до и после серии гидроакустических измерений или одновременно с измерениями.

Условия положительной рефракции и квазиоднородного слоя. Стратификация вод в ноябре-декабре обусловлена выхолаживанием верхнего слоя, турбулентностью и конвективным перемешиванием, которым охвачен весь водный слой [23]. Поэтому поле скорости звука довольно однородно, что и проявлялось в период измерений, в ноябре-декабре, в виде слабых положительных или близких к нулю значений вертикальных градиентов скорости звука. Ансамбль реализаций вертикального распределения скорости звука показан на рис. 2.1 а. Горизонтальные градиенты скорости звука несколько меньше на трассе № 2, чем на трассе № 1. Стратификация обуславливала приповерхностный звуковой канал либо квазиоднородный водный слой, при слабых горизонтальных градиентах скорости звука.

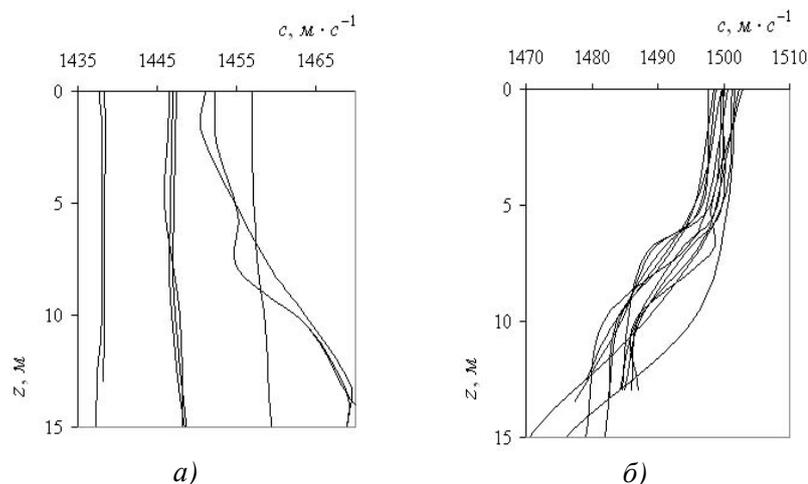


Рис. 2.1 – Зависимость скорости звука от глубины: ноябрь-декабрь 1982 г., декабрь 1983 г. (а), сентябрь 1984 г. (б)

Условия отрицательной рефракции. Стратификация вод в сентябре соответствует установившимся летним условиям и определяется равномерным прогреванием верхнего слоя, положением минимума скорости звука у дна и значительной пространственно-временной изменчивостью [23]. Неоднородность поля скорости звука может быть больше на трассе № 2 из-за близости к Днепро-Бугскому гидрофронт – прерывистый выход речных вод приводит к появлению линз распресненной воды. Однако направление изотак поперек трассы № 1 также может приводить к большим горизонтальным градиентам.

Трасса № 1. Значения вертикальных градиентов скорости звука, в основном, не превышали $0,58 \text{ c}^{-1}$ в верхнем слое, $2,4 \text{ c}^{-1}$ в слое термогалоклина и $0,3 \text{ c}^{-1}$ вблизи дна.

Трасса №2. В верхнем пятиметровом слое значения градиентов составляли $0,22-0,96 \text{ c}^{-1}$.

На рис. 2.1 б показан ансамбль реализаций вертикального распределения скорости звука в сентябре, по которому можно судить о вертикальной и временной изменчивости поля скорости звука. Стратификация вод приводила к формированию придонного звукового канала. Поле скорости звука в горизонтальном направлении в одной серии измерений можно считать довольно однородным для обеих трасс.

2.2 Геоакустическая модель

Геоакустическая модель дна является эмпирической [17, 18, 24, 25] и так же, как и гидролого-акустическая – это база данных. Однако роль ее для описания модели волновода может оказаться решающей, как это и имеет место для рассматриваемой акватории.

Для распространения звука важно относительное положение верхней и нижней границы волновода, которое определяется изменением глубины моря вдоль трассы – рельефом дна, рис. 2.2. Вдоль трассы № 2 глубина моря оставалась почти постоянной на первых ~9 км, уклон дна – пренебрежимо мал. На втором ее участке наблюдалось холмистое возвышение высотой ~0.9 м. Трасса № 1 имела постоянную глубину только на первых ~2 км, затем она изменялась почти линейно до величины 18.5 м, и, начиная с расстояния ~5.5 км,

оставалась постоянной. Хотя здесь уклон дна был больше, чем на трассе № 2, но и в пределах клинообразного участка оставался малым, $\sim(0.03-0.17)^\circ$.

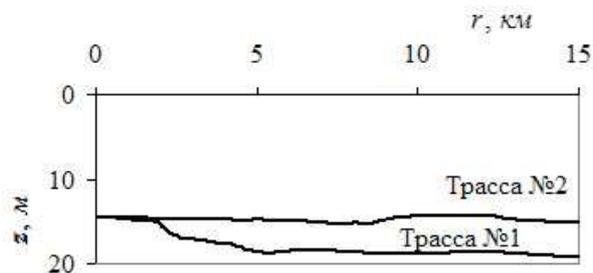


Рис. 2.2 – Рельеф дна вдоль гидроакустических трасс

Выделенные структурные элементы рельефа на обеих трассах свидетельствуют о выполнении условия [26]:

$$\frac{2\pi}{\lambda} \left| \frac{dH}{dr} H \right| \ll 1, \quad (2.1)$$

где λ – длина звуковой волны;

H – глубина моря;

r – расстояние.

По этому критерию положение границ волновода на трассе № 2 и № 1 можно принять плоскопараллельным из-за незначительного уклона дна.

Рассмотрим стратификацию донных отложений на выбранных трассах, исходя из усредненной картины геологического строения дна шельфа СЗЧМ [17, 18, 25]. Состав донных отложений на трассах одинаков: ракушечники (средняя скорость продольных волн $c_b=1500 \text{ м}\cdot\text{с}^{-1}$, плотность $\rho_b=(1.6-1.9)\cdot 10^3 \text{ кг}\cdot\text{м}^{-3}$); илы мелкоалевритовые ($c_b=1470 \text{ м}\cdot\text{с}^{-1}$, $\rho_b=(1.38-1.67)\cdot 10^3 \text{ кг}\cdot\text{м}^{-3}$); суглинки ($c_b=(1500-1550) \text{ м}\cdot\text{с}^{-1}$, $\rho_b=(1.92-2.04)\cdot 10^3 \text{ кг}\cdot\text{м}^{-3}$); пески и глины ($c_b=(1600-1900) \text{ м}\cdot\text{с}^{-1}$, $\rho_b=(1.8-2.1)\cdot 10^3 \text{ кг}\cdot\text{м}^{-3}$). Стратификация донных отложений вдоль трасс отличается как по мощности слоев, так и по литологическому составу. Так, на трассе №1 верхний слой осадков сложен ракушечниками, ниже следует слой илов мелкоалевритовых, которые выходят на поверхность у берегов о. Тендра. Неоднородность структуры дна здесь проявляется и в присутствии слоя алевритов неравномерной мощности, вклинивающегося в слой песка и начинающегося с ~ 6 км от о. Тендра ($c_b=1470 \text{ м}\cdot\text{с}^{-1}$, $\rho_b=(1.38-1.67)\cdot 10^3 \text{ кг}\cdot\text{м}^{-3}$). В отличие от трассы № 1, вдоль трассы № 2 верхний слой осадочных отложений составляют илы мелкоалевритовые переменной мощности, его подстилает слой ракушечников небольшой мощности, который имеет выход на поверхность и протяженность ~ 1.5 км. Неоднородность состава грунтов по этой трассе проявляется и в слоях, залегающих ниже. Так, суглинки непостоянной мощности на отдельных участках протяженностью 1–2.5 км замещаются супесями, алевритами и песками. Средняя картина стратификации донных отложений не позволяет оценить степень газонасыщенности четвертичных отложений и выделить зоны аномально низких скоростей продольных волн на

выбранных трассах, однако их присутствие исключить нельзя [25]. Содержание органического вещества в размере 60–80 %, как, например, в сапропелевых илах, приводит к заметному понижению скорости продольных волн, до величины $(250–1050) \text{ м}\cdot\text{с}^{-1}$, и сильному поглощению энергии звуковых колебаний, что характерно и для газонасыщенных илов. Раковинно-детритовый материал представляет собой основной фактор изменчивости свойств осадочных пород, содержащих его, и приводит к увеличению скорости продольных волн, иногда на $(100–200) \text{ м}\cdot\text{с}^{-1}$, это вносит элемент неопределенности в параметры нижней границы волновода.

Таким образом, структура донных отложений характеризуется изменчивостью, что проявляется в нарушении их регулярной стратификации, общее свойство вертикальной структуры осадочных отложений на обеих трассах – их слоистость с нарушением плоскопараллельности границ. Причем, на трассе № 1 мощность слоев меньше, а нарушение стратификации больше. Отмечается различие литологического состава грунтов на трассах в двух верхних слоях осадочных пород, а также изменение литологического состава слоев в горизонтальном направлении. При численном моделировании звукового поля геоакустическую модель такого уровня сложности задавать нецелесообразно, в том числе из-за отсутствия точных данных. Усредненную модель дна на квазистационарных трассах можно построить в предположении плоскопараллельности границ слоев – это первый уровень ее упрощения, рис. 2.3. Значения вертикального градиента скорости продольных волн в осадочных слоях двух трасс составляют $0.5–2.0 \text{ с}^{-1}$.

Отсутствие точных данных о стратиграфии, литологии, значениях скорости продольных и поперечных волн, их коэффициентов поглощения приводит к целесообразности аппроксимации модели дна – это второй уровень ее упрощения. Для различных мелководных районов Мирового океана широко используется аппроксимация геоакустической модели дна жидким поглощающим полупространством, выбор характеристик которого изложен в работе [27]. Относительная плотность определяется выражением: $m = \rho_b / \rho_w$, где ρ_b и ρ_w – плотность осадков и водного слоя, соответственно. Для распространения звука важно знание величины затухания продольных волн, δ_l , для учета которого скорость звука принимается комплексной – $c_l^* = c_l(1 - i\delta_l)$. Коэффициент δ_l и коэффициент эффективного затухания β_l , выраженный в $\text{дБ}\cdot\text{м}^{-1}$, связаны соотношением [27]:

$$\delta_l = \frac{\beta_l(f)c_l}{20 \lg e \cdot 2\pi \cdot f}. \quad (2.2)$$

Данные о затухании звука *in situ* представляют собой эффективное затухание, учитывающее поглощение, вызванное упругими деформациями и рассеянием на неоднородностях грунта. Для песчаных осадков $\delta_l = 0.008–0.03$; в илистых песках $\delta_l = 0.007–0.024$; в песчаном иле $\delta_l = 0.003–0.027$; в иле $\delta_l = 0.001–0.026$; в глине $\delta_l = 0.0006–0.018$ [27]. Отметим, что средние значения коэффициента потерь поперечных волн для песка примерно в три раза, а для глины на порядок могут превышать средние значения δ_l [27].

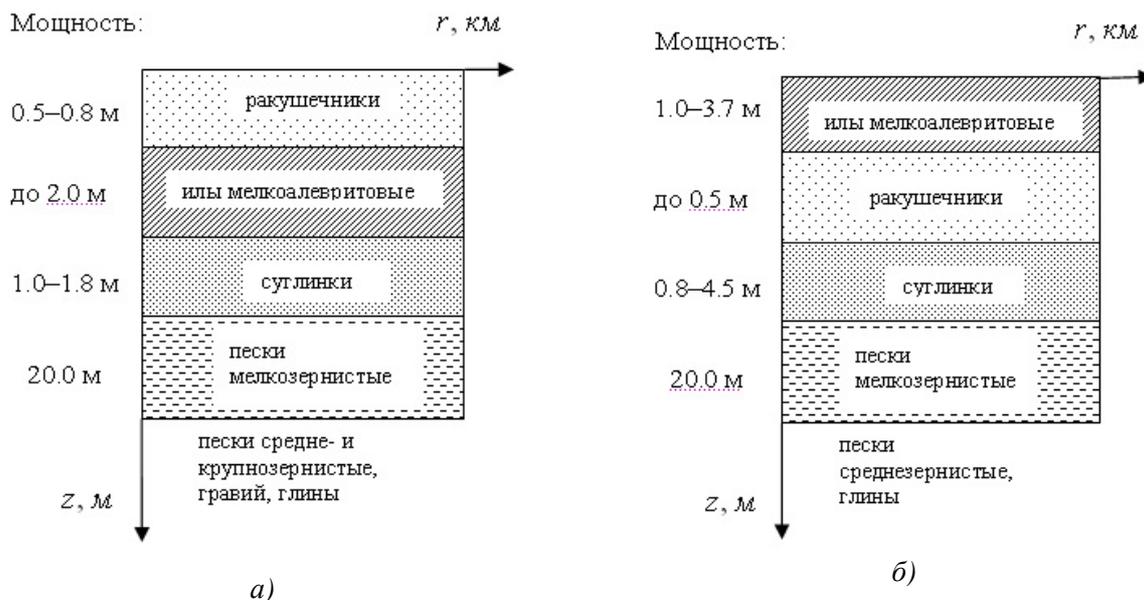


Рис. 2.3 – Геоакустическая модель дна трассы № 1 (а) и № 2 (б)

Аппроксимация геоакустической модели жидким поглощающим полупространством требует использования средних значений плотности, скорости продольных волн и их коэффициента потерь в пределах эффективного слоя, толщина которого зависит от частоты. Модель дна в виде жидкого полупространства с параметрами, характерными для песчаного грунта, используется и для шельфа Восточной части Черного моря – $c_l=1900 \text{ м} \cdot \text{с}^{-1}$, $\delta_l=0.01$, $m=2.15$ [10].

Подводя итог выбора гидролого-акустической и геоакустической модели, учитывая положение границ волновода, в качестве физической модели волновода для квазистационарных трасс на шельфе СЗЧМ примем регулярный, однородный в горизонтальном направлении, волновод с плоскопараллельными границами, вертикально стратифицированным водным слоем с произвольным изменением скорости звука, лежащим на жидком однородном поглощающем полупространстве. Толщина волновода соответствует глубине моря, $H=15 \text{ м}$, что более точно выполняется для трассы № 2.

Степень адекватности физической модели волновода в данном случае целиком определяется геоакустической моделью дна. Приведенное выше описание геоакустической модели основано на литературных данных и уже по этой причине характеризуется некоторой априорной неопределенностью, касающейся нерегулярности границ, литологического состава и акустических свойств осадочных слоев. В частности, априорная неопределенность может быть весьма высокой в случае существования осадочного слоя с низкой скоростью продольных волн и в случае возбуждения поперечных волн, а также из-за неровностей нижней границы волновода.

2.3 Теоретическое описание звукового поля

Выбор теоретического описания звукового поля связан с физической моделью волновода, особенно с геоакустической моделью дна и ее аппроксимацией, в данном случае, жидким однородным поглощающим полупространством. Для теоретического описания звукового поля на квазистационарных трассах была принята теория нормальных волн [28–31]. Выполнение условия:

$$r \gg H^2 / \lambda \quad (2.3)$$

свидетельствует об адекватности ее использования [26], а выполнение условия (2.1) – о возможности пренебречь взаимодействием нормальных волн на неровностях рельефа. Отсутствие аналитического решения уравнения Гельмгольца, удовлетворяющего сложным краевым условиям, приводит к необходимости математического моделирования звукового поля, использующего численные методы для решения краевой задачи (верхняя граница волновода является абсолютно свободной). Численное моделирование осуществлялось по алгоритму вычисления звукового поля точечного гармонического излучателя в слоисто-неоднородном волноводе, лежащем на жидком однородном поглощающем полупространстве, методом обобщенных нормальных волн В.Д. Крупина [32], которое успешно использовалось ранее (например, в работе [33]). Потери в грунте характеризуются тангенсом угла потерь – отношением мнимой и реальной частей комплексного показателя преломления на границе водного слоя и нижнего полупространства. Потенциал скоростей звукового поля в этом случае представляет собой суперпозицию полного спектра нормальных волн (распространяющихся, слабозатухающих, неоднородных):

$$\Phi = \frac{V}{4iH} \sum_{l=1}^N A_{NW l} \cdot H_0^{(1)}\left(\frac{r}{H} \sqrt{S_l}\right), \quad (2.4)$$

где V – колебательная скорость;

H – толщина волновода;

$A_{NW l}$ – амплитуда нормальной волны номера l ;

$H_0^{(1)}$ – функция Ханкеля первого рода;

r – расстояние;

S_l – собственное значение нормальной волны номера l .

Амплитуды нормальных волн, которые рассчитываются для фиксированных координат излучателя, ζ_s , и приемника, ζ_r , выражаются через собственные значения S_l и собственные функции $\Psi(\zeta_s, S_l)$, $\Psi(\zeta_r, S_l)$ краевой задачи Штурма-Лиувилля с краевыми условиями третьего рода,

$$A_{NW l} = \frac{\Psi(\zeta_r, S_l) \cdot \Psi(\zeta_s, S_l)}{\int_0^1 \Psi^2(\zeta_r, S_l) d\zeta + \left(\frac{dG}{dS}\right)_{S_l} \Psi^2(1, S_l)}, \quad (2.5)$$

где $\zeta_s = z_s / H$, $\zeta_r = z_r / H$ – нормированная глубина излучателя и приемника, соответственно;

$G(S_l) = \frac{S}{m} th(s \cdot L_0)$ – комплексный импеданс жидкого однородного полупространства, зависящий от спектрального параметра S_l ;

$$s = \sqrt{S_l - (kH \cdot n_s)^2};$$

$m = \rho_b / \rho_w$ – отношение плотности жидкого полупространства ρ_b к плотности водного слоя ρ_w ;

$L_0 = |L_0|e^{i\pi/4}$ – толщина однородного жидкого слоя, которая аппроксимирует жидкое полупространство;

n_s – показатель преломления на глубине источника звука.

Зависимость модуля нормированной собственной функции от вертикальной координаты $\zeta = z/H$:

$$W_l = \left| \frac{\Psi(\zeta, S_l)}{\int_0^1 \Psi^2(\zeta, S_l) d\zeta + \left(\frac{dG}{dS}\right)_{S_l} \Psi^2(1, S_l)} \right|. \quad (2.6)$$

Каждая нормальная волна характеризуется безразмерным волновым числом $\sqrt{S_l} = k_l \cdot H$, фазовой скоростью $c_{phl} = 2\pi f / |\text{Re } k_l|$, коэффициентом затухания $\beta_{NWl} = 8.68 \cdot |\text{Im } k_l|$, дБ·м⁻¹.

Наконец, вычисляется зависимость аномалии интенсивности от расстояния для каждой пары значений координат излучателя и приемника:

$$A(r) = 20 \lg \left| \frac{\Phi}{\Phi_0} \right| = 20 \lg \left| \frac{p}{p_0} \right|, \quad (2.7)$$

где Φ_0 – потенциал скоростей, создаваемый точечным источником звука в однородной не поглощающей среде без границ на расстоянии r :

$$\Phi_0 = \frac{V \cdot e^{ikr}}{4\pi r}. \quad (2.8)$$

Звуковое давление в паскалях с учетом затухания звука в морской среде,

$$p(r) = \frac{p_0(r)}{r} 10^{A(r)/20} \cdot 10^{-0.5 \cdot \beta' \cdot r}, \quad (2.9)$$

где $p_0 = \sqrt{\frac{P_a \cdot \rho c}{4\pi \cdot r^2}}$ – звуковое давление, создаваемое источником звука единичной

мощности $P_a = 1$ Вт на расстоянии $r = 1$ м;

$$\beta' = \frac{0.11 \cdot f}{1 + f^2} + \frac{44 \cdot f^2}{4100 + f^2} + 3 \cdot 10^{-4} \cdot f^2 \text{ – затухание звука частоты } f \text{ (кГц) [34].}$$

Экспериментальная проверка адекватности акустической модели квазистационарных трасс условиям распространения звука будет рассмотрена в разделе 3 части 2 работы, которая будет напечатана в следующем номере Гидроакустического журнала. Оценка физической адекватности акустической модели гидроакустических трасс позволит уточнить характеристики жидкого полупространства, определить необходимость изменения геоакустической модели дна, краевых условий задачи, теоретического описания звукового поля.

Литература

1. Orlando C. Rodriguez, Sergio M. Jesus. Physical limitations of travel-time-based shallow water tomography // J. Acoust. Soc. Am. – 2000. – 108, №6. – P. 2816-2822.
2. Буренин А.В., Моргунов Ю.Н., Стробыкин Д.С. Экспериментальные исследования особенностей применения векторных приемников в задачах томографии океана // Акустический журнал – 2007. – 53, №6. – С. 786-790.
3. Казарова А.Ю., Любавин Л.Ю., Стромков А.А. Эмпирические ортогональные функции в акустике мелкого моря // Труды Нижегородской акустической научной сессии, ННГУ – 2002. – С. 54–57. – Режим доступа: <http://www.rf.unn.ru/rus//sci/books/061>.
4. Акуличев В.А., Каменев С.И., Леонтьев А.П., Моргунов Ю.Н. Акустическая томография на шельфе: методы, средства, перспективы // Доклады X школы-семинара акад. Л.М. Бреховских, совмещенной с XIV сессией Российского акустического общества: Сб. трудов. – М.: ГЕОС, 2004. – С. 187-192.
5. Burenkov S., Dubrovsky N., Sabinin K. Acoustic monitoring of the Black Sea // Problems of the Black Sea. International Conference, Sebastopol, Ukraine, November 10–15, 1992, Plenary reports – Sebastopol: МНІ UAS, 1992. – P. 101-110.
6. Иванов В.А., Кузнецов А.С., Сабинин К.Д. Перспективы развития дистанционного гидролого-акустического мониторинга Черного моря // Экологическая безопасность прибрежной и шельфовой зон и комплексное использование ресурсов шельфа: Сб. научных трудов – Севастополь, 2001. – С. 168-173.
7. Богусевич В.К., Замаренова Л.Н., Скипа М.И. Повышение эффективности экологического и ресурсного мониторинга морской среды за счёт применения метода акустического горизонтального лучевого зондирования // Экологическая безопасность прибрежной и шельфовой зон и комплексное использование ресурсов шельфа: Сб. трудов – 2006. – вып. 14. – С. 349-357.
8. Богусевич 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 – Сб. трудов – 2007. – С. 56-62.
9. Фурдуев А.В. Акустический мониторинг изменчивости подводной среды (экспериментальная проверка новых методов) // Акустический журнал – 2001. – 47, №3. – С. 422-430.
10. Аредов А.А., Неклюдов В.И., Фурдуев А.В. Влияние изменчивости гидрологических условий на интерференционную структуру звукового поля в шельфовой зоне // Акустический журнал – 2001. – 47, №5. – С. 581-585.
11. Бункин Ф.Б., Кравцов Ю.А., Омельченко Н.Н., Петников В.Г., Шмелев А.Ю. Результаты исследования стабильности звуковых сигналов на стационарных акустических трассах / Акустические волны в океане – М.: Наука, 1987. – С. 84-91.
12. Бабий В.И., Бурлакова И.Б., Вировлянский А.Л., Демиховский С.В., Кравцов Ю.А., Кукушкин В.Д., Петников В.Г., Ривелис Е.А., Славинский М.М., Смирнов Н.М., Фарфель В.А., Шмелев А.Ю. Стационарная акустическая трасса Крым-Кавказ / Акустика океанской среды. п/ред. Л.М. Бреховских – М.: Наука, 1989. – С. 75-79.
13. Вадов Р.А. Открытие подводного звукового канала, экспериментальные исследования, региональные различия // Акустический журнал – 2007. – 53, №3. – С. 313-328.
14. Студеничник Н.В. Энергетические и пространственно-временные характеристики звукового поля в подводном звуковом канале Черного моря // Акустический журнал – 2003. – 49, №2. – С. 250-261.
15. Дивизинюк М.М. Акустические поля Черного моря – Севастополь: Госокеанариум, 1998. – 352 с.

16. Студеничник Н.В. Исследования коэффициента отражения от дна в диапазоне углов полного внутреннего отражения // Акустический журнал – 2002. – 48, №4. – С. 539-546.
17. Ильин А.В., Орленок В.В., Шурко И.И. Исследование скорости звука в донных отложениях мелкого моря // Вопросы судостроения. Сер. Акустика. ЦНИИ РУМБ. – 1980. – вып. 14. – С. 68-73.
18. Наумов И.В. Геоакустическая модель донных осадков Каркинитского залива (Черное море) // Вопросы судостроения. Сер. Акустика. ЦНИИ РУМБ. – 1980. – вып. 14. – С. 79-83.
19. Богусевич 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.
20. Белогорцев А.С., Белов А.И., Журавлев В.А., Хоха Ю.В. Акустические модели шельфовых морских акваторий и проблема их физической адекватности // Труды Нижегородской акустической научной сессии, ННГУ, 2002. – С. 64-67. – Режим доступа: <http://www.rf.unn.ru/rus/sci/books/061>.
21. Терминологический словарь-справочник по гидроакустике. п/ред. А.Е. Колесникова. – Л.: Судостроение, 1989. – 367 с.
22. Виноградов К.А., Розенбург М.Ш., Толмазин Д.М. Атлас гидрологических характеристик северо-западной части Черного моря – К.: Наукова думка, 1966. – 66 с.
23. Блатов А.С., Булгаков Н.П., Иванов В.А., Косарев А.Н., Тужилкин В.С. Изменчивость гидрофизических полей Черного моря – Л.: Гидрометеиздат, 1984. – 239 с.
24. Гамильтон Э.Л. Геоакустические модели морского дна / Акустика морских осадков. п/ред. Хэмптона Л. – М.: Мир, 1977. – С. 176-210.
25. Изучение геодинамических процессов на дне моря, имеющих инженерное значение (в пределах шельфа Черного и Азовского морей и крупных водохранилищ УССР). Заключительный отчет. Т. 2. / МВССО УССР, Одесский ордена Трудового Красного Знамени государственный университет им. И.И. Мечникова. – № ГР 76008737. – Одесса, 1980.
26. L.W. Dean. Interaction between sound waves // J. Acoust. Soc. Am. – 1962. – 34 – P. 1039–1044.
27. Абакумова Н.К., Галкин О.П. Угловая зависимость коэффициента отражения от дна для различных типов морских осадков // Вопросы судостроения. Сер. Акустика. ЦНИИ РУМБ. – 1980. – вып. 14. – С. 90-100.
28. Бреховских Л.М., Лысанов Ю.П. Теоретические основы акустики океана – Л.: Гидрометеиздат, 1982. – 260 с.
29. Толстой И., Клей К.С. Акустика океана – М.: Мир, 1969. – 301 с.
30. Завадский В.Ю. Вычисление волновых полей в открытых областях и волноводах – М.: Наука, 1972. – 558 с.
31. Кацнельсон Б.Г., Петников В.Г. Акустика мелкого моря – М.: Наука, 1997. – 191 с.
32. Крупин В. Д. Вычисление звуковых полей в слоисто-неоднородном волноводе на БЭСМ-6. / Отчет АКИН. – № ГР 1276718. – М., 1972.
33. Агеева Н.С., Крупин В.Д. Поведение частотных характеристик мод в мелком море при варьировании скорости продольных волн в осадочном слое дна и профиля скорости звука в водном слое // Акустический журнал – 1984. – 30, №5 – С. 577-584.
34. W.H. Thorp. Analytic description of the low frequency attenuation coefficient // J. Acoust. Soc. Am. – 1967. – 42 – P. 270.
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.V. 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.