

УДК 534.23: 629.127

АНОМАЛЬНЫЕ СВОЙСТВА ЗВУКОВЫХ ПОЛЕЙ ВБЛИЗИ МОРСКОГО ДНА

Часть 2

Б.А. Касаткин, Н.В. Злобина,
С.Б. Касаткин

Институт проблем морских
технологий ДВО РАН¹

Сформулированы физические основы перехода к несамосопряжённой модельной постановке граничных задач при описании пограничных явлений в акустике слоистых сред. Приведены экспериментальные результаты, подтверждающие сложный характер звукового поля вблизи морского дна, не имеющие адекватного объяснения в рамках классической акустики, использующей самосопряжённую модельную постановку. Физически обоснован процесс формирования придонной волны пограничного типа на границе раздела вода–морское дно. Приведены результаты экспериментальных исследований придонной волны на гидрофизическом полигоне Тихоокеанского океанологического института ДВО РАН, подтверждающие выводы теории. Отмечается важная роль придонной волны при разработке средств гидроакустического навигационного обеспечения и средств гидроакустической связи для АНПА дальнего радиуса действия.

■ ВВЕДЕНИЕ

Настоящая работа является продолжением ранее выполненных работ [1, 2], в которых были изложены физические основы теории отражения сферических волн на границе раздела двух сред. Однако сама теория была построена в рамках новой для этого класса задач несамосопряжённой модельной постановки. Поскольку классическая теория отражения сферических волн использует самосопряжённую модельную постановку, то новая теория в отличие от классической была названа в этих работах обобщённой теорией. По физическому смыслу обобщённая теория является неким расширением классической теории, поскольку использует для описания процесса отражения более широкий класс функций, включающий кроме расходящихся волн сходящиеся волны отдачи и неоднородные волны комплексного спектра источника. Влияние сходящихся волн отдачи на процесс отражения

сферических волн в области докритических углов падения с характерным эффектом самофокусировки и было предметом рассмотрения в работах [1,2].

Участие неоднородных волн комплексного спектра источника необходимо для корректного описания тех особенностей, которые возникают при закритических углах падения и связаны с полным внутренним отражением в трактовке, соответствующей гипотезе Ньютона. Настоящая работа посвящена описанию именно этих особенностей. Здесь уместно напомнить, что Ньютон в своей гипотезе всего лишь предложил считать лучи, соответствующие падающей и отражённой волнам при полном отражении, ветвями параболы, подошва которой находится в нижней, отражающей среде. Такая геометрическая трактовка затекания энергии на горизонт полного внутреннего отражения с последующим возвратом, была принята всеми акустиком и

оптиками без исключения, а её кажущаяся самоочевидность скомпенсировала полное отсутствие математического обоснования на протяжении последующих трёх столетий. Особенно велика роль неоднородных волн комплексного спектра источника при формировании пограничного волнового движения, которое принципиально отличается от классического описания.

В классическом описании отражение сферической волны на границе раздела двух сред является зеркальным по любой спектральной составляющей источника. Это означает, что при малых углах скольжения, в предельном случае при нулевых углах скольжения, отражение становится противофазным, отражённая волна гасит падающую волну, а суммарное звуковое поле вырождается под действием эффекта мягкого

¹ 690091, Владивосток, ул. Суханова, 5а. Тел.: (4232)432578. E-mail: kasatkas@marine.febras.ru

экрана. При этом уровень звукового давления убывает вблизи границы раздела с квадратом расстояния, т.е. существенно быстрее, чем в свободном пространстве, а сама граница раздела вырождается в мягкий экран. Однако экспериментальная гидроакустика не подтверждает такое быстрое вырождение звукового поля вблизи морского дна при достаточном удалении от его источника. Хорошо известны гидроакустические системы дальнего обнаружения подводных источников шумоизлучения (подводных лодок), такие как американская система «SOSUS», в которых приёмная антенная решётка укладывается непосредственно на морское дно. Сама система прекрасно работает, не испытывая какого-либо влияния эффекта мягкого экрана, предсказанного классической акустикой, что можно трактовать лишь как отсутствие такого эффекта в реальной гидроакустике.

Несамосопряжённая модельная постановка совершенно иначе описывает процесс распространения звуковых волн вблизи морского дна при сколь угодно малых углах скольжения. В этой модельной постановке процесс полного внутреннего отражения действительно трактуется как процесс затекания звуковой энергии в морское дно с последующим возвратом, при котором отражение становится не противофазным, а каустическим. При таком отражении никакой компенсации падающей волны волной отражённой не происходит, а само звуковое поле не вырождается на границе раздела.

Все вопросы распространения звуковых волн вблизи морского дна приобретают первостепенное значение при разработке средств гидроакустического навигационного обеспечения АНПА дальнего радиуса действия, а также при

разработке гидроакустических систем связи с повышенной пропускной способностью. Теоретической основой для разработки таких систем может быть только несамосопряжённая модельная постановка, преимущества которой при описании полного внутреннего отражения и пограничных явлений были отмечены в работах [3, 4].

■ Новый подход к описанию пограничных явлений

Экспериментальные результаты, подробно описанные в работе [1], убедительно свидетельствуют о том, что само словосочетание «полное внутреннее отражение» является не совсем корректным. В классическом решении, полученном в самосопряжённой модельной постановке, отражение при закритических углах падения является полным в том числе и по потоку мощности, а потому не может быть внутренним. В обобщённом решении, полученном в несамосопряжённой модельной постановке, отражение при закритических углах падения не является полным, и поэтому является внутренним, т.е. связанным с затеканием звуковой энергии на горизонт полного внутреннего отражения с последующим возвратом. Для реализации такого затекания с возвратом граница раздела должна обладать ненулевой прозрачностью по потоку мощности,

т.е. коэффициент отражения должен быть меньше единицы. Именно таким должно быть само явление, и именно об этом говорят экспериментальные результаты, описанные в работе [1]. Эта чисто терминологическая путаница связана с тем, что в арсенале волновой акустики нет ни волновых, ни лучевых составляющих типа криволинейных парабол, вершину (или подошву) которых можно расположить как нам удобно в нужном месте, например, для описания полного внутреннего отражения по Ньютону. Мы будем пользоваться здесь классической терминологией, подразумевая при этом, что коэффициент отражения сферической волны при закритических углах падения, отнесённый к физической границе раздела, должен быть меньше единицы (по модулю) в математическом описании. В то же время по физическому смыслу он должен равняться единице (по модулю) на некоторой каустической границе, играющей роль горизонта полного внутреннего отражения. Поскольку несамосопряжённая модельная постановка (в отличие от самосопряжённой постановки) предполагает использование комплексного спектра модельного источника, рассмотрим сначала, как он выглядит в различных модельных описаниях.

На рис. 1 приведены функции поперечного сечения для неоднородных волн комплексного

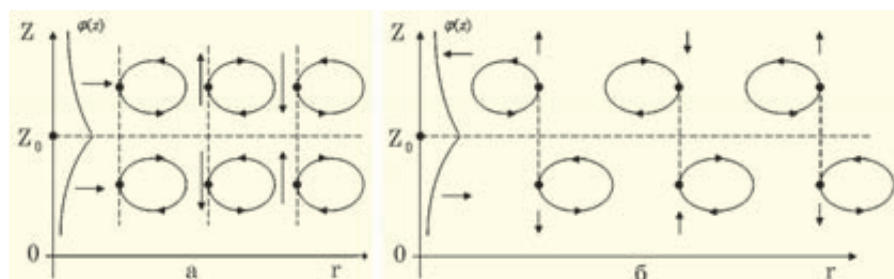


Рис. 1. Структура неоднородных волн, соответствующих комплексному спектру источника: а – самосопряжённая модельная постановка ($I_r \neq 0, I_z = 0$), б – несамосопряжённая модельная постановка ($I_r = 0, \langle I_z \rangle = 0$)

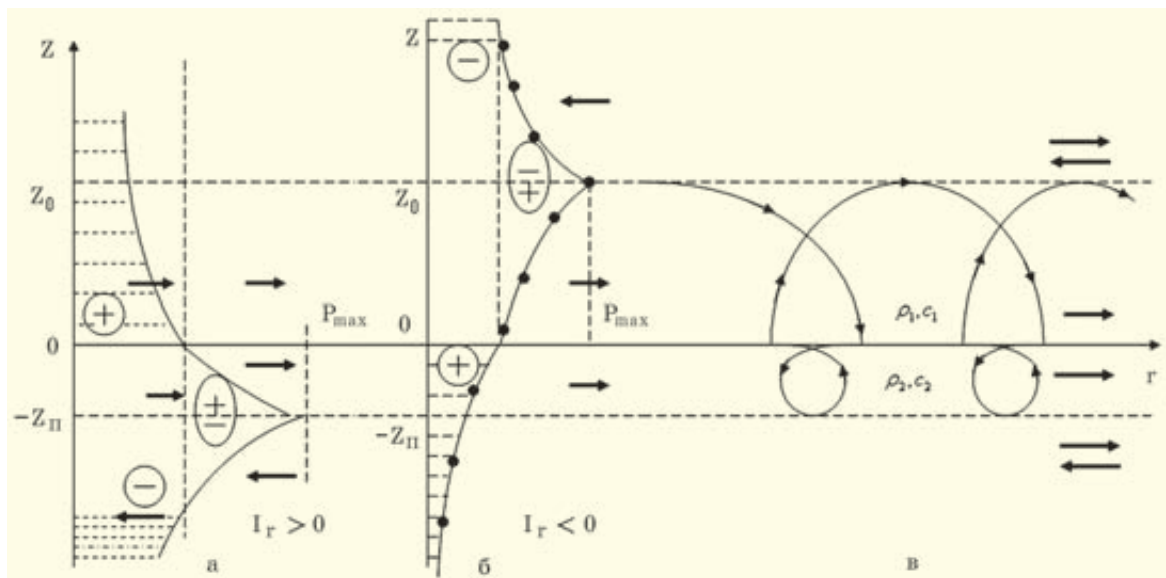


Рис. 2. Лучевая трактовка обобщённой нормальной волны; а – придонная (грунтовая) составляющая, локализованная на горизонте полного внутреннего отражения $z_n = \rho_{12}z_0$; б – приповерхностная (водная) составляющая, локализованная на горизонте источника; в – лучевая трактовка суммарного волнового движения, $\rho_{12} = \rho_1 / \rho_2$ (ρ – плотность среды)

спектра точечного источника в самосопряжённой модельной постановке (а) и в несамосопряжённой модельной постановке (б). Там же указан тип поляризации волны, определяемый направлением вращения материальных частиц в поле неоднородной волны. В самосопряжённой модельной постановке давление и нормальная компонента вектора колебательной скорости непрерывны на горизонте источника, но связанный с ними горизонтальный поток мощности отличен от нуля, как это поясняется рис. 1, а. Появление дополнительного потока мощности объясняется тем, что тип поляризации неоднородной волны скачком изменяется на горизонте источника. В несамосопряжённой модельной постановке поле неоднородных волн комплексного спектра является разрывным по давлению и нормальной компоненте вектора колебательной скорости, но непрерывным, сохраняющим направление вращения и тип поляризации относительно горизонта источника. При этом горизонтальный поток мощности тождественно равен нулю,

как это поясняется рис. 1, б, а вертикальный поток мощности равен нулю в среднем. Поскольку модельный источник должен моделировать реальный источник малых размеров типа сферического ненаправленного излучателя, мощность которого определяется только вещественным спектром, то его описание в несамосопряжённой модельной постановке является предпочтительным, а говоря точнее, единственно корректным.

Вернёмся теперь к граничной задаче на отражение сферической волны от границы раздела двух жидких полупространств. При помещении источника в слоистую среду, например, в одно из двух полупространств, разделённых импедансной границей раздела, баланс потоков мощности в поле неоднородных волн комплексного спектра нарушается и появляется отличный от нуля горизонтальный поток мощности. В самом решении при этом появляется обобщённая нормальная волна дискретного спектра, соответствующая полюсу коэффициента отражения, которой нет в классиче-

ском решении, построенном в самосопряжённой модельной постановке. Обобщённая нормальная волна существует в виде двух парциальных составляющих, придонной (или грунтовой) и приповерхностной (или водной). Эти составляющие отличаются инверсией профиля вертикального распределения относительно границы раздела и соответственно горизонтом локализации. Структура функций поперечного сечения поясняется рис. 2.

Каждая составляющая обобщённой нормальной волны разрывна по волновой функции на горизонте локализации, но непрерывна по импедансу, определённому через отношение давления к нормальной компоненте колебательной скорости. Для каждой составляющей отличен от нуля суммарный горизонтальный поток мощности, пропорциональный скачку плотности на границе раздела. Однако полный горизонтальный поток мощности, соответствующий этим двум парциальным составляющим, равен нулю. Скорость распространения обобщённой волны меньше скорости звука

в морской среде (на 5–8% для реальных значений параметров грунта), что свидетельствует о том, что она является примером пограничного волнового движения с неоднородной структурой, но эта пограничная волна очень специфична. Специфика волнового движения предполагает его привязку к некоторому горизонту, т.е. к источнику, и полную трансформацию сходящихся волн отдачи в расходящиеся волны при их отражении от оси симметрии как от жёсткой границы. В свою очередь, полная трансформация обеспечивает полный (нулевой) баланс горизонтальных потоков мощности в суммарном волновом движении. Само суммарное волновое движение имеет характер продольного (горизонтального) резонанса в слоистой системе простейшего типа. В случае, если источник находится на импедансной границе раздела, обобщённая нормальная волна вырождается в стоячую волну, локализованную на границе раздела.

Появление в решении (т.е. пока ещё только на бумаге) такого необычного типа волнового движения, как продольный резонанс, т.е. резонанс в направлении, для которого отсутствуют какие-либо отражающие границы, не является математической абстракцией, как может показаться на первый взгляд. Ближайший аналог волнового движения типа продольного резонанса впервые был обнаружен в твёрдых волноводах типа пластин и стержней и описан теоретически в работе [5], а затем подтверждён экспериментально. Физической основой формирования продольного резонанса в твёрдом волноводе является пара встречных волн, квазипродольная и квазипоперечная волны, связанные механизмом взаимной трансформации при отражении от границ волновода. В случае, если нормальная

волна зарождается в твёрдом волноводе как поперечная, то соответствующая частота является частотой поперечного (толщинного) антирезонанса. В случае, если нормальная волна зарождается как квазипродольная, то соответствующая частота является частотой продольного резонанса, образованного прямой и обратной квазипродольными волнами через механизм их взаимной трансформации при отражении от оси симметрии как от жёсткой границы. Таким образом, присутствие обратной волны в паре встречных волн является обязательным для образования продольного резонанса в твёрдом волноводе, который считается хорошо изученным объектом теоретических и экспериментальных исследований.

Звуковое поле в жидких средах содержит только одну составляющую волнового движения, продольную волну, но эффект зарождения нормальной волны происходит по той же самой схеме, т.е. через механизм трансформации сходящейся волны отдачи в расходящуюся волну при её отражении от оси симметрии как от жёсткой границы. Сама пара встречных волн, сходящаяся и расходящаяся волны, появляется при описании комплексного спектра источника, который играет существенную роль в несамосопряжённой модельной постановке соответствующей граничной задачи. Но звуковое поле всегда сохраняет особенности источника, породившего это поле. В рассматриваемом случае обобщённая нормальная волна полностью копирует особенности поля неоднородных волн комплексного спектра самого источника.

Такая же парная структура встречных волн имеет место и для волны Шолте на границе раздела жидкость–твёрдое тело. Эта волна прекрасно наблюда-

ется в случае морского дна осадочного типа, когда скорость её распространения меньше скорости распространения поперечной волны ($c_{III} < c_t$), которая, в свою очередь, на порядок меньше скорости звука в воде ($c_t \ll c_1$). Различие заключается в том, что на границе раздела жидкость–твёрдое тело существуют не одна, а две волны Шолте, скорость распространения которых близка к скорости волны Рэля ($c_{III} = c_R \pm \Delta c$). В работе [6] приведены экспериментальные результаты, прекрасно подтверждающие как сам факт существования волн Шолте в случае морского дна осадочного типа, так и их парную структуру. Аналогичная парная структура волн Шолте подтверждается экспериментально и в другом предельном случае ($c_t > c_1$), который подробно исследован в работе [7].

Иначе говоря, такой тип волнового движения является не только модельным, математически допустимым в конкретной несамосопряжённой модельной постановке, но и наблюдаемым в физическом эксперименте. Однако его физическая реализация требует и вполне конкретного способа возбуждения, т.е. подбора типа излучателя и его расположения относительно границы раздела. Оптимальным излучателем, структура звукового поля которого наиболее близка к структуре поля обобщённой волны, является вертикально ориентированный излучатель типа цилиндрической антенны с дипольным законом распределения функции возбуждения. Вертикальная структура излучателя и его основные характеристики поясняются рис. 3.

Достаточно простая в реализации конструкция излучателя для возбуждения обобщённой нормальной волны была описана в работе [8] и успешно

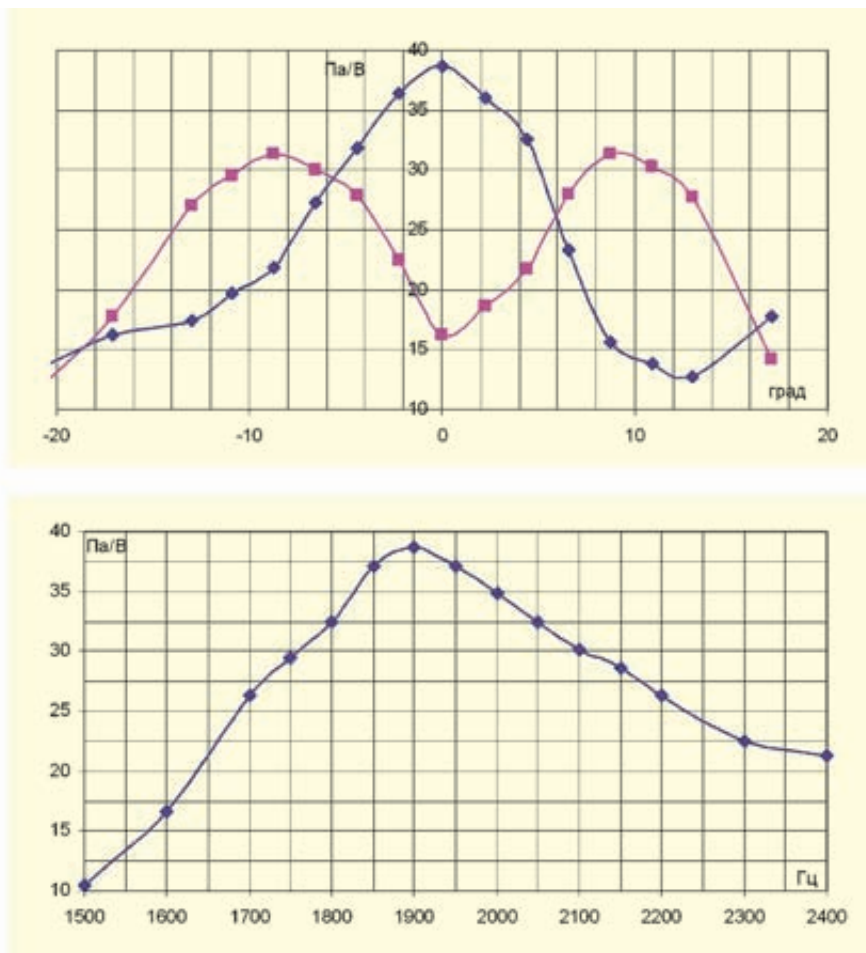
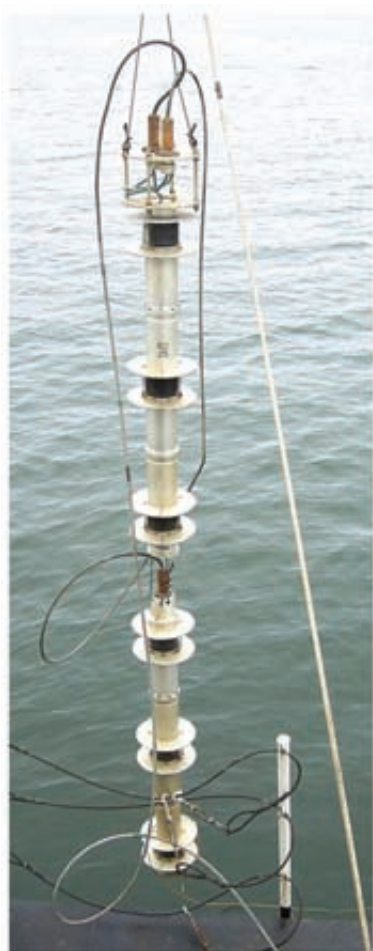


Рис. 3. Макет излучающей антенны и его характеристики: характеристика направленности (вверху) при синфазном и противофазном включении модулей и частотная характеристика чувствительности (внизу)

использована в экспериментальных работах для возбуждения придонной составляющей обобщённой нормальной волны, которые будут подробно проанализированы ниже. Излучатель содержит пару вертикально ориентированных излучающих модулей, установленную непосредственно на морское дно. При синфазном включении модулей они создают односторонний поток мощности вдоль границы раздела. При дипольном включении модулей формируется характеристика направленности, максимум которой соответствует вполне определённому углу падения на границу раздела. Этот угол должен соответствовать углу максимальной энергетической прозрачности границы раздела по потоку мощности в опреде-

лении работы [1]. Для грунтов осадочного типа соответствующий угол скольжения равен $10-15^\circ$. Физический механизм возбуждения обобщённой волны дипольным излучателем заключается в следующем.

В соответствии с математическим описанием поток мощности через импедансную границу раздела в области за критических углов падения вещественного спектра является знакопеременным, взаимным. В диапазоне углов комплексного спектра и при учёте потерь в грунте он направлен из водной среды в морское дно для водной составляющей и из морского дна в водную среду для грунтовой составляющей обобщённой нормальной волны. Полное внутреннее отражение как раз и подразумевает такой энер-

гообмен, отличный от нуля в локальном смысле, но равный нулю в среднем. Угол падения, соответствующий максимальной энергетической прозрачности границы раздела, известен как угол Брюстера. Поскольку затекание звуковой энергии из водной среды в морское дно происходит при закритических углах падения, то грунтовая волна при этом тормозится, а её амплитуда экспоненциально растёт в поперечном направлении, но до конечной величины, соответствующей горизонту локализации придонной составляющей обобщённой волны $z = -z_n$, играющему роль горизонта полного внутреннего отражения. Обратное вытекание звуковой энергии из морского дна в морскую среду происходит при комплексных

углах, соответствующих комплексному спектру источника, т.е. с торможением водной волны. При этом её амплитуда также растет экспоненциально при удалении от границы раздела, но до конечной величины, соответствующей горизонту локализации приповерхностной составляющей обобщенной волны, т.е. горизонту источника. Иными словами, обобщенная волна оказывается локализованной в придонном коридоре между этими двумя горизонтами, которые играют роль каустических границ. Вне этого горизонта звуковая энергия должна возвращаться обратно на модельный источник в соответствии со структурой обобщенной волны резонансного типа.

Однако в звуковом поле реального источника полная компенсация потоков мощности невозможна. Это будет означать, что в суммарном поле появятся водная и грунтовая (боковая) составляющие, распространяющиеся под нулевыми углами скольжения к границе раздела в сопряженных средах, ответственные за отбор энергии от источника. Суммарное волновое движение пограничного типа, представленное обобщенной волной, дополненной водной и грунтовой (боковой) волнами, названо в работе [8] придонной волной. Горизонтальные волновые числа, соответствующие отдельным парциальным

составляющим, распределены примерно эквидистантно в некотором диапазоне изменения. Это означает, что при распространении придонной волны отдельные парциальные составляющие будут интерферировать с образованием крупномасштабных интерференционных структур в придонной области, которые могут наблюдаться экспериментально. Скорость распространения суммарного волнового движения, или придонной волны, определенная в этой работе алгоритмом усреднения обратных скоростей отдельных парциальных составляющих с некоторыми весовыми коэффициентами, близка к скорости звука в воде или меньше её в зависимости от выбора весовых коэффициентов. В неоднородной морской среде с профилем вертикального распределения скорости звука $c(z)$ скорость распространения придонной волны определяется значением скорости звука у дна, т.е. её минимальным значением на профиле вертикального распределения. Лучевая трактовка придонной волны и её парциальных составляющих поясняется рис. 4.

■ **Экспериментальные исследования придонной волны**

Примечательно, что первые экспериментальные свидетель-

ства аномальной интерференционной структуры звукового поля вблизи морского дна были получены с помощью технических средств, расположенных на АНПА, в экспедиции 1992 г., проводимой в Японском море. Эти результаты демонстрируют уникальные возможности использования самого АНПА для исследования морской среды и звуковых полей, которые создаются различными техническими средствами, в том числе и теми, которые размещаются на АНПА.

На рис. 5, а приведены фрагменты изображения морского дна, полученные с помощью лоатора бокового обзора (ГБО) с рабочей частотой $f = 75$ кГц, установленного на борту АНПА. Снимки получены при глубоководных испытаниях АНПА в Японском море на глубине $H \approx 3000$ м и расстоянии АНПА от дна $h \leq 10$ м. Характерной особенностью полученных изображений являются крупномасштабные интерференционные структуры, которыми окаймлены наружные края темных объектов, т. е. впадин или ям. Пространственный период интерференции составляет десятки метров. Если предположить, что в процессе интерференции участвуют водная и боковая (грунтовая) волны, которые являются единственными составляющими суммарного поля в классическом описании, то

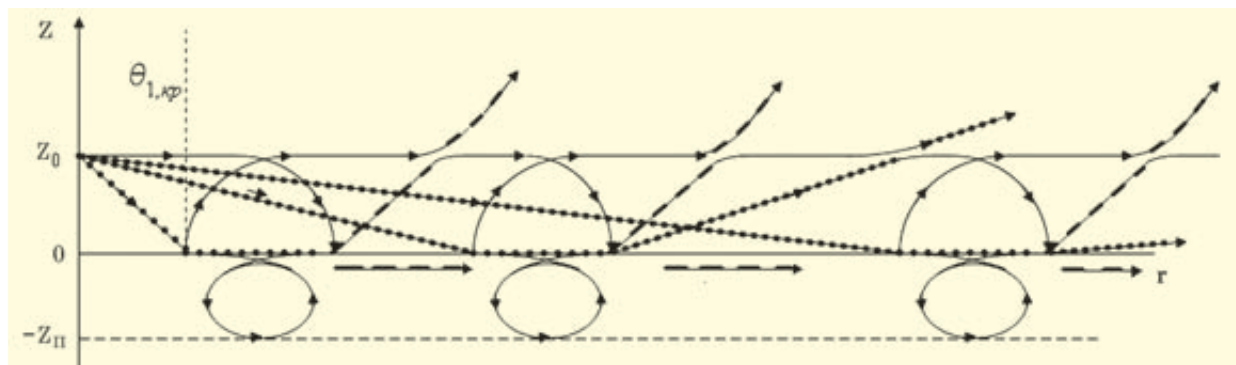


Рис. 4. Лучевая трактовка формирования придонной волны тремя парциальными составляющими: водной волной (точки), обобщенной нормальной волной (сплошная линия), грунтовой (боковой) волной (штриховая линия)

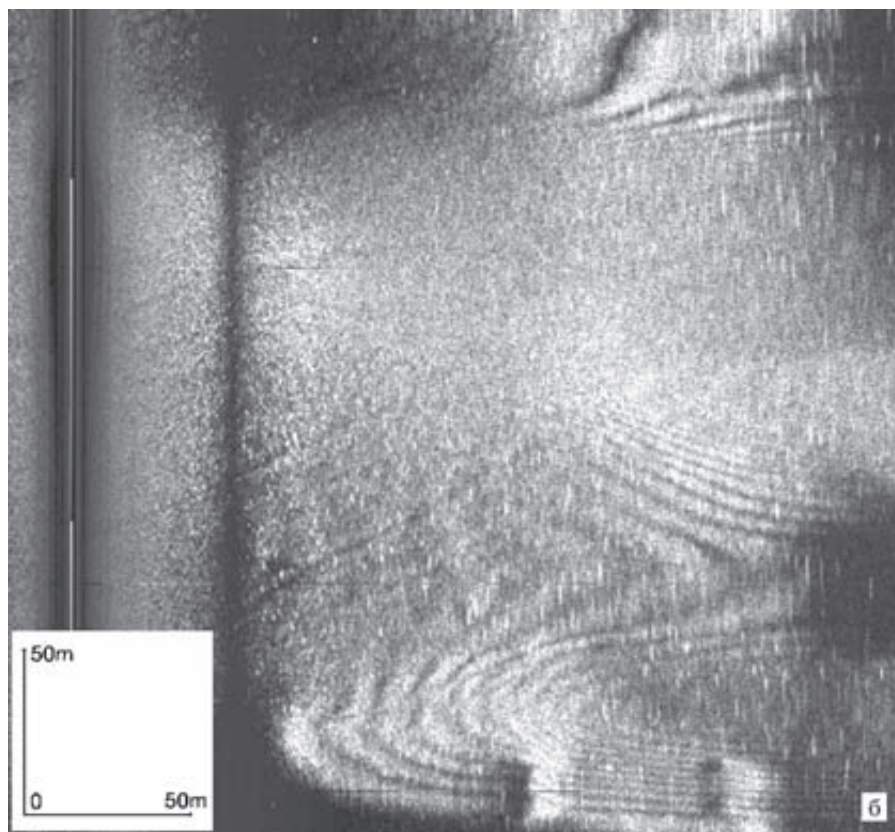
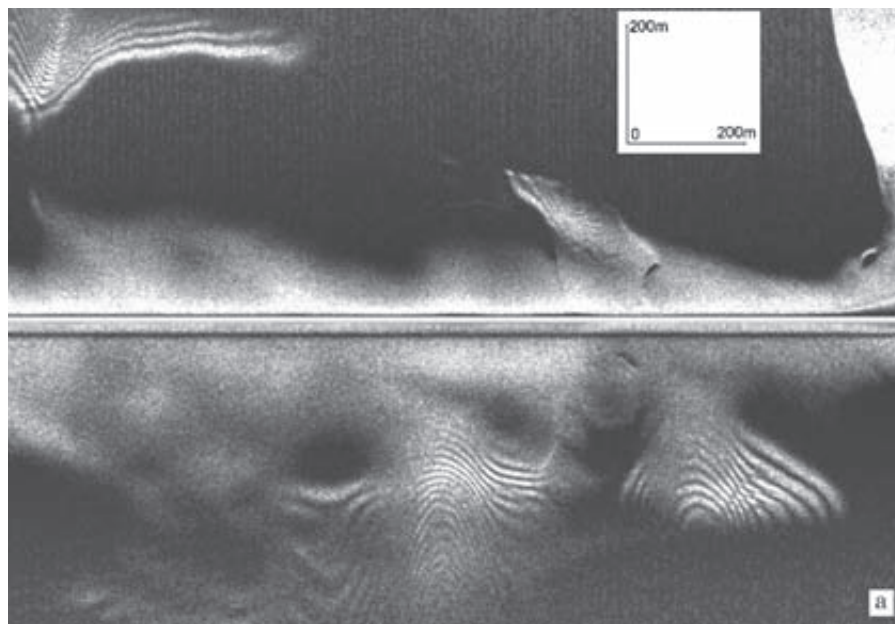


Рис. 5, а, б. Локационное изображение морского дна. Японское море, глубина 3000 м (а); Баренцево море, глубина 150 м (б)

период интерференции должен быть на два порядка меньше. Столь крупномасштабная интерференция является аномальной с точки зрения классической теории, поскольку классическое описание не предполагает наличия каких-либо других

волн вблизи границы раздела вода–морское дно. В последующих экспедициях были получены не менее удивительные интерференционные структуры, изображённые на рис. 5, б, в.

Однако эти результаты хорошо укладываются в рамки

обобщенной теории, если предположить, что интерферируют не две, а три составляющие: грунтовая волна, водная волна и обобщенная волна, которым соответствуют скорости распространения $c_2 > c_1 > c_n$. Скорость распространения водной волны в придонной области составляет 1450–1500 м/с, скорость распространения обобщенной нормальной волны для грунтов осадочного типа составляет 1350–1400 м/с, скорость распространения грунтовой волны для грунтов того же типа составляет 1650–1750 м/с. Распространяясь совместно с разными фазовыми скоростями, эта тройка волн образует характерные крупномасштабные интерференционные структуры, которые обнаруживаются при локационной съёмке морского дна гидролокатором бокового обзора как в глубоком, так и в мелком море [8]. За период эксплуатации АНПА, разработанных в ИПМТ ДВО РАН с 1992 по 2007 гг., было зафиксировано около сотни крупномасштабных интерференционных структур с характерными особенностями, которые впервые были описаны в работах [9,10]. Все эти данные убедительно свидетельствуют об устойчивости самого явления, связанного с образованием придонной волны с особой структурой звукового поля. Характерная особенность интерференционных структур заключается и в том, что все они образуются только при наличии донных ям или впадин и только на внешней стороне этих ям. Эта особенность связана с тем, что сама обобщенная составляющая придонной волны существует в двух модификациях, отличающихся инверсией профиля вертикального распределения. Придонный источник возбуждает только придонную (грунтовую) составляющую обобщенной нормальной волны, которая, затекая по горизонт

полного внутреннего отражения, не может интерферировать с водной и грунтовой волнами сплошного спектра.

Однако при распространении придонной составляющей через донную яму происходит инверсия придонной (грунтовой) обобщённой нормальной волны в волну приповерхностную (или водную), как это поясняется в рамках лучевых представлений рис. 5, г. В свою очередь, приповерхностная составляющая взаимодействует в видимой части звукового поля с водной и грунтовой волнами сплошного спектра. Именно эта интерференция создаёт крупномасштабные интерференционные структуры, окаймляющие внешний контур донной ямы. Иначе говоря, донные ямы позволяют визуализировать обобщённую составляющую придонной волны через механизм интерференции, а сами экспериментальные результаты косвенно подтверждают и трёхволновую структуру придонной волны, и парную (инверсную) структуру её обобщённой составляющей.

С целью экспериментального подтверждения факта существования придонной волны и определения ее кинематических характеристик были организованы два эксперимента на гидрофизическом полигоне Тихоокеанского океанологического института ДВО РАН в заливе Петра Великого. Первый эксперимент был выполнен осенью 2005 г. В ходе его проведения были организованы метрологически обеспеченные измерения на стационарных трассах, включающих донный излучатель и мобильную донную приемную станцию, координаты которых были определены достаточно точно с помощью GPS. Длина короткой трассы составляла $R = 7226$ м, длина длинной трассы $R = 20169$ м, глубина моря в районе эксперимента слабо менялась вдоль трассы и

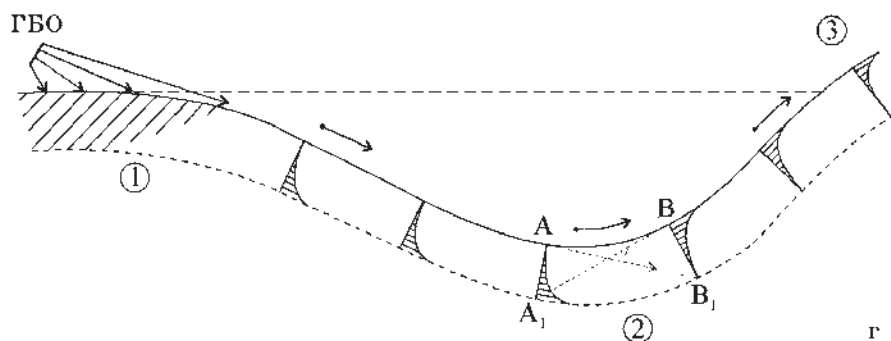
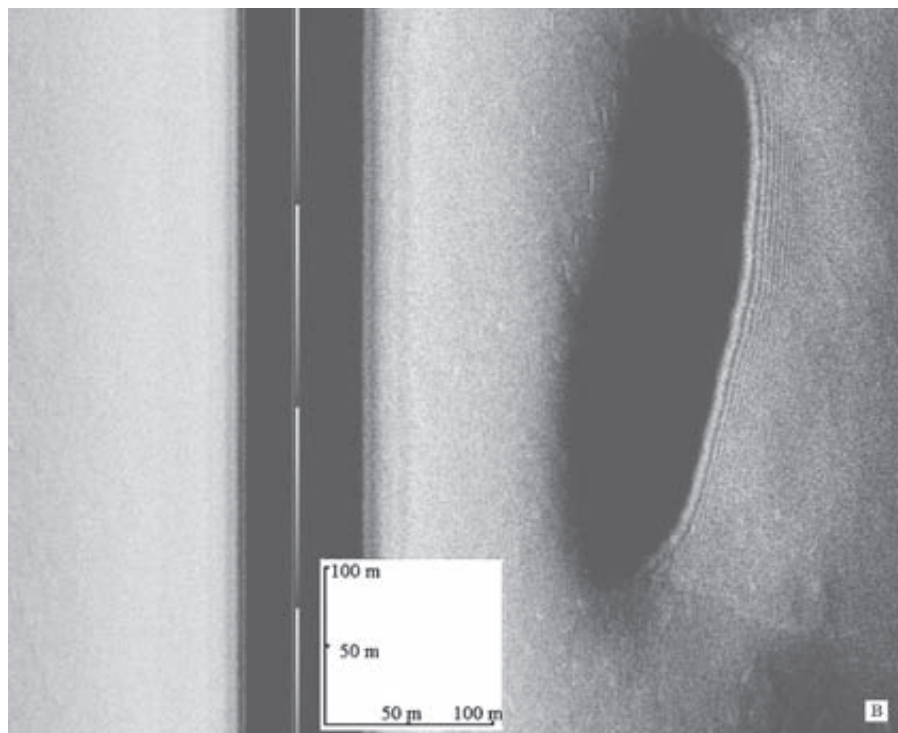


Рис. 5, в, г. Локационное изображение морского дна. Северный Ледовитый океан, глубина 1600 м (в); лучевая трактовка инверсии придонной обобщённой нормальной волны в приповерхностную (г): 1 – зона возбуждения, 2 – зона инверсии, 3 – зона интерференции

составляла $h = 40$ м, усредненный профиль скорости звука с явно выраженным придонным звуковым каналом поясняется рис. 6.

В качестве рабочего сигнала использовались M -последовательности длиной 511 символов, длительность элементарного символа составляла 8 периодов несущей частоты, рабочие частоты составляли 369, 623, 1199, 2526 Гц. Длительность записи рабочего сигнала на каждой частоте составляла 90 минут, что позволяет считать обрабатываемый массив данных статистиче-

ски вполне представительным. При корреляционной обработке принятых сигналов использовались акустическая копия излученного сигнала, принятая контрольным гидрофоном, и система единого времени. Результаты этого эксперимента впервые описаны в работе [11].

Второй эксперимент был проведен также на акватории Гидрофизического полигона, но весной 2006 г. в отличных от осенних гидрологических условиях. Весенний профиль скорости $c(z)$ характеризовался линейной зависимостью с

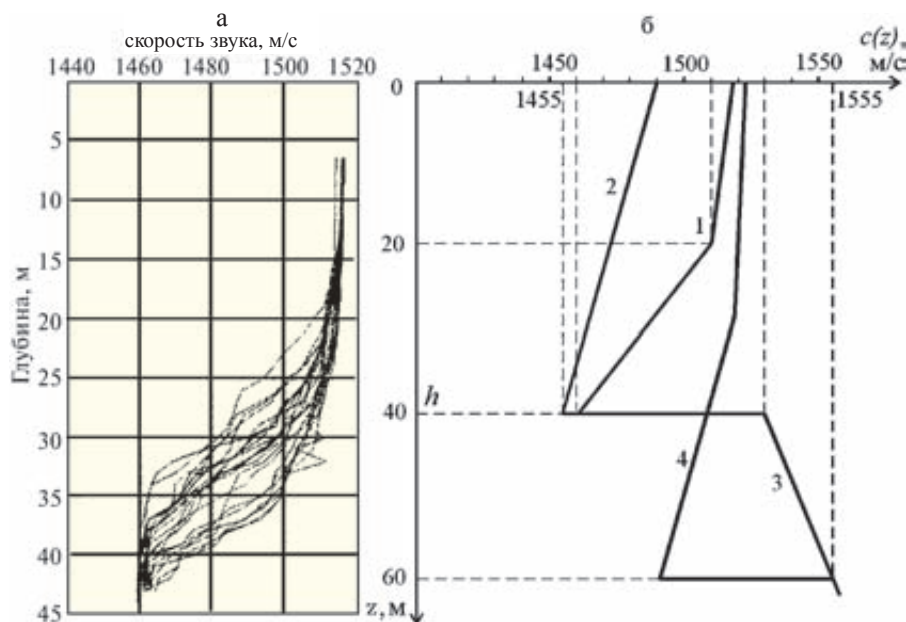


Рис. 6. Суточная изменчивость (а) и усредненный профиль (б) скорости звука: 1 – осенний профиль (2005 г.), 2 – весенний профиль (2006 г.), 3 – профиль скорости звука в грунте, 4 – осенний профиль (2007 г.)

характерными значениями скорости звука на поверхности и у дна $c(0) = 1490$ м/с, $c(h) = 1454$ м/с. В ходе эксперимента на той же трассе с тем же излучателем и в том же диапазоне частот были организованы восемь донных приемных станций на различных расстояниях от излучателя. Погрешность определения координат для различных дистанций с учетом ошибки измерения координат в каждой точке не превышала 5 м. В соответствии с этими оценками относительная погрешность измерения скорости распространения сигналов на больших дистанциях составляет менее 0,1%, что говорит о высокой (для гидроакустики) метрологической обеспеченности эксперимента.

Результаты обоих экспериментов свидетельствуют о вырождении высокоскоростных лучевых траекторий с максимальными углами скольжения $\beta_{\max} = (15-18)^\circ$, реализующих принцип Ферма, которым соответствует эффективная лучевая скорость $c_{\text{эфф}} = 1490$ м/с в первом эксперименте и $c_{\text{эфф}} = 1468$ м/с во втором эксперименте. Под-

тверждается и вывод об отсутствии дисперсионной зависимости в исследованном диапазоне частот. Экспериментально полученная оценка скорости распространения придонной волны на больших дистанциях хорошо соответствует расчетному значению.

Таким образом, результаты обоих экспериментов, выполненных на стационарных трассах в мелком море в широком диапазоне рабочих частот и расстояний в различных гидрологических условиях, хорошо соответствуют друг другу и обобщенной теории полного внутреннего отражения. При изменении гидрологических условий, соответствующих осеннему и весеннему экспериментам, скорость звука у дна уменьшается на 5 м/с и ровно на столько же уменьшается скорость распространения сигналов в эксперименте, однозначно отождествляемая нами со скоростью распространения придонной волны. Отсутствие дисперсии скорости распространения придонной волны также подтверждает ее пограничный характер и полное соответствие теории.

Экспериментальные исследования эффективности возбуждения придонной волны направленным излучателем были выполнены на акватории Уссурийского залива с использованием двух обеспечивающих судов, на одном из которых располагался направленный излучатель, а на другом – двухканальная приемная система. Измерения проводились на короткой трассе длиной 9 км и на длинной трассе длиной 27 км. Глубина моря в месте проведения эксперимента изменялась в пределах 30–40 м для первой трассы длиной 9 км и 34–60 м для второй трассы длиной 27 км. Профиль скорости звука в Уссурийском заливе для сентября приведен на рис. 6. Заметное отклонение профиля скорости звука от усредненного объясняется аномально теплой погодой в первой половине сентября, в течение которой температура воды повысилась на 1–2° относительно средней, а изоскоростной слой занимает практически все первые 30 м.

Направленный излучатель устанавливался на дно с помощью донного якоря массой 40 кг и короткого якорь-троса, прикрепленного к нижнему фланцу излучателя, вертикальное положение излучателя обеспечивала специальная плавучесть. Кроме этого, на кабель-тросе на расстоянии 30–40 м от первого якоря крепился с помощью кабельного зажима второй якорь массой 40 кг, который обеспечивал устойчивое положение излучателя при возможном дрейфе обеспечивающего судна, стоящего на якорю в месте постановки излучателя. Второе обеспечивающее судно выходило в заданную точку трассы, вставало на якорь и опускало на дно донную двухканальную приемную систему. Координаты обеспечивающих судов в местах постановки измерялись

непрерывно с помощью GPS-приёмников.

Цель эксперимента заключалась в оценке эффективности работы донного направленного излучателя при возбуждении придонной волны, а также в оценке скорости распространения акустического сигнала и потерь на распространение. В эксперименте использовались шумоподобные фазоманипулированные сигналы с рабочей частотой 1900 Гц, содержащие 511 символов, длительность каждого символа составляла 8 периодов несущей частоты. Уровень сигнала, излучаемого направленным излучателем в этом эксперименте, примерно соответствовал уровню сигнала, излучаемого ненаправленным излучателем на частоте 2526 Гц в экспериментах 2005 г., установленным на акустогидрофизическом полигоне ТОИ ДВО РАН, который был использован в этом эксперименте. Однако масса пьезокерамики в составе разработанного макета направленного излучателя примерно в четыре раза меньше массы пьезокерамики в составе ненаправленного излучателя ТОИ ДВО РАН, выполненного на основе двух колец изделия «Днестр», что говорит о достаточно высокой удельной эффективности разработанного направленного излучателя.

Характеристика направленности излучателя соответствовала противофазному включению модулей и не менялась во время эксперимента. Анализ экспериментальных данных говорит о том, что нерегулярность волнового фронта, которая характеризуется двукратным увеличением глубины моря вдоль трассы распространения сигнала, усложнила структуру звукового поля и его основные характеристики. Так, потери на распространение, измеренные на длинной трассе, заметно превышают соответствующие сферическому

закону, тогда как потери на распространение, измеренные вдоль короткой трассы постоянной глубины, соответствуют сферическому закону.

Однако форма импульсного отклика также хорошо соответствует одномодовому режиму распространения сигнала, а заметные искажения формы импульса возникают только на предельных расстояниях. Следует также отметить, что все сигналы на длинной трассе уверенно обнаруживались на фоне шумовой помехи визуально на экране монитора до применения корреляционной свёртки принятого сигнала с акустической электронной копией. Это свидетельствует о том, что потенциальная дальность действия донной станции на основе разработанного направленного излучателя будет на порядок больше при использовании шумоподобных сигналов и соответствующей корреляционной обработке сигналов с использованием акустической электронной копии (при благоприятных гидрологических условиях). Усреднённые по всей трассе значения групповой скорости распространения высокоскоростного луча в придонном звуковом канале и скорости распространения медленной придонной волны составляют $\langle c_r \rangle = 1516$ м/с и $\langle c_n \rangle = 1502$ м/с соответственно.

Результаты всех трёх экспериментов 2005-2007 гг. показали хорошее соответствие друг другу и обобщённой теории. На рис. 7 представлены результаты сравнительной оценки скорости распространения быстрой волны рефракционного типа (лучевая теория), придонной волны (обобщённая теория) и групповая скорость распространения сигнала, измеренная экспериментально во всех трёх экспериментах. Экспериментальные данные, полученные на всех трёх трассах, свидетельствуют

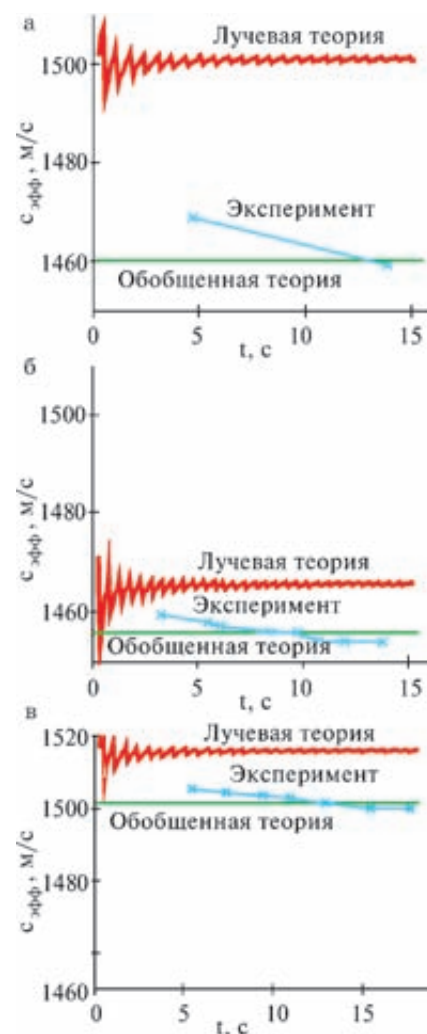


Рис. 7. Пример сравнительной оценки лучевой скорости (лучевая теория), скорости придонной волны (обобщенная теория) и групповой скорости сигнала (эксперимент) для осеннего эксперимента 2005 г. (а), весеннего эксперимента 2006 г. (б) на трассе длиной 20 км в диапазоне частот 369–2526 Гц и для осеннего 2007 г. (в) эксперимента на трассе длиной 27 км на частоте 1,9 кГц

о наличии некоторой переходной, или ближней, зоны. В пределах этой зоны скорость распространения акустического сигнала отличается от скорости, предсказанной по лучевой или обобщённой теории. Однако с увеличением расстояния скорость распространения сигнала уверенно стремится к низкоскоростному пределу, предсказанному обобщённой теорией. На этом низкоскоростном пределе скорость распространения

сигнала на 1–3 м/с меньше скорости звука у дна, что говорит о том, что придонная волна продолжается в обе стороны от границы раздела неоднородной волной, амплитуда которой убывает экспоненциально быстро.

Как показал последний эксперимент, именно донный высоконаправленный в вертикальной плоскости излучатель является наиболее эффективным для возбуждения придонной волны. Это положение свидетельствует о том, что механизм полного внутреннего отражения по Ньютону парирует эффект мягкого экрана и делает возможным горизонтальное распространение придонной волны вдоль границы раздела и эффективное её возбуждение направленным излучателем, излучение которого максимально приближено к границе раздела вода–морское дно. Результаты всех трёх экспериментов описаны подробно в работе [8].

■ Теоретическая оценка скорости распространения придонной волны

Характерная особенность придонной волны заключается в том, что её скорость распространения не зависит от частоты. Этот теоретический результат хорошо подтверждают и экспериментальные данные, описанные выше, по крайней мере в исследованном диапазоне частот 369–2526 Гц. Само значение скорости распространения зависит от акустических характеристик сопряжённых сред, но эта зависимость не является однозначной. Первая формула для оценки скорости распространения придонной волны была дана в работе [11]. Она построена в соответствии с алгоритмом усреднения обратных скоростей отдельных парциальных составляющих с весовыми коэффициентами,

пропорциональными удельной мощности, приходящейся на каждую составляющую:

$$\left(\frac{c_{np}}{c_1}\right)_1 = \frac{2}{1 + \rho_{12}^2 c_{12} + \sqrt{(1 - \rho_{12}^2)(1 - \rho_{12}^2 c_{12}^2)}}, \tag{1}$$

где $\rho_{12} = \rho_1 / \rho_2$, $c_{12} = c_1 / c_2$, ρ_1, c_1, ρ_2, c_2 – плотность и скорость звука в воде и грунте соответственно.

В соответствии с формулой (1) скорость придонной волны на доли процента (не более 1%) превышает скорость водной волны в придонном слое во всём диапазоне изменения параметров морского дна осадочного типа. Это говорит о том, что придонная волна в описании, соответствующем формуле (1), не является неоднородной волной пограничного типа. Сама формула (1) требует дальнейшей коррекции.

Другой вариант оценочной формулы можно получить, если полагать, что грунтовая (боковая) составляющая входит в состав придонной волны только на малых расстояниях, а затем её вклад в суммарное поле быстро убывает, т.к. её амплитуда убывает с квадратом расстояния, т.е. быстрее, чем убывает амплитуда других составляющих. Формула усреднения в этом случае имеет вид:

$$\left(\frac{c_{np}}{c_1}\right)_2 = \frac{2 - \rho_{12}^2}{1 + \sqrt{(1 - \rho_{12}^2)(1 - \rho_{12}^2 c_{12}^2)}}. \tag{2}$$

Численные оценки скорости распространения придонной волны в сравнительном плане поясняются рис. 8. Рис. 8, а соответствует формуле (1), рис. 8, б соответствует формуле (2). В соответствии с формулой (2) скорость распространения придонной волны в некоторой дальней зоне меньше скорости звука

в воде на 1-5% во всём диапазоне изменения параметров морского дна осадочного типа. Это означает, что сама придонная волна в описании, соответствующем формуле (2), остаётся неоднородной волной пограничного типа. В итоге формулы (1), (2) позволяют выполнить численные оценки, которые прогнозируют максимальную изменчивость (коридор изменчивости) скорости распространения придонной волны в зависимости от расстояния и от параметров морского дна осадочного типа. Сходную зависимость от расстояния, по крайней мере качественную, имеют экспериментальные результаты по измерению скорости распространения придонной волны, описанные выше.

В качестве рабочей формулы, предпочтительной для практических оценок, можно предложить усреднённую формулу (3):

$$\left(\frac{c_{np}}{c_1}\right)_{cp} = \frac{1}{2} \left[\frac{2}{1 + \rho_{12}^2 c_{12} + \sqrt{(1 - \rho_{12}^2)(1 - \rho_{12}^2 c_{12}^2)}} + \frac{2 - \rho_{12}^2}{1 + \sqrt{(1 - \rho_{12}^2)(1 - \rho_{12}^2 c_{12}^2)}} \right]. \tag{3}$$

Численные оценки скорости распространения придонной волны, выполненные по формуле (3), представлены на рис. 8, в. Усреднённая по расстоянию скорость распространения придонной волны меньше скорости звука в воде на 1–2% процента. Это означает, что придонная волна в описании, соответствующем формуле (3), остаётся неоднородной волной пограничного типа во всей области изменения параметров морского дна, что и требовалось обеспечить при выборе формулы, аппроксимирующей искомую скорость распространения. Различные варианты построения акусти-

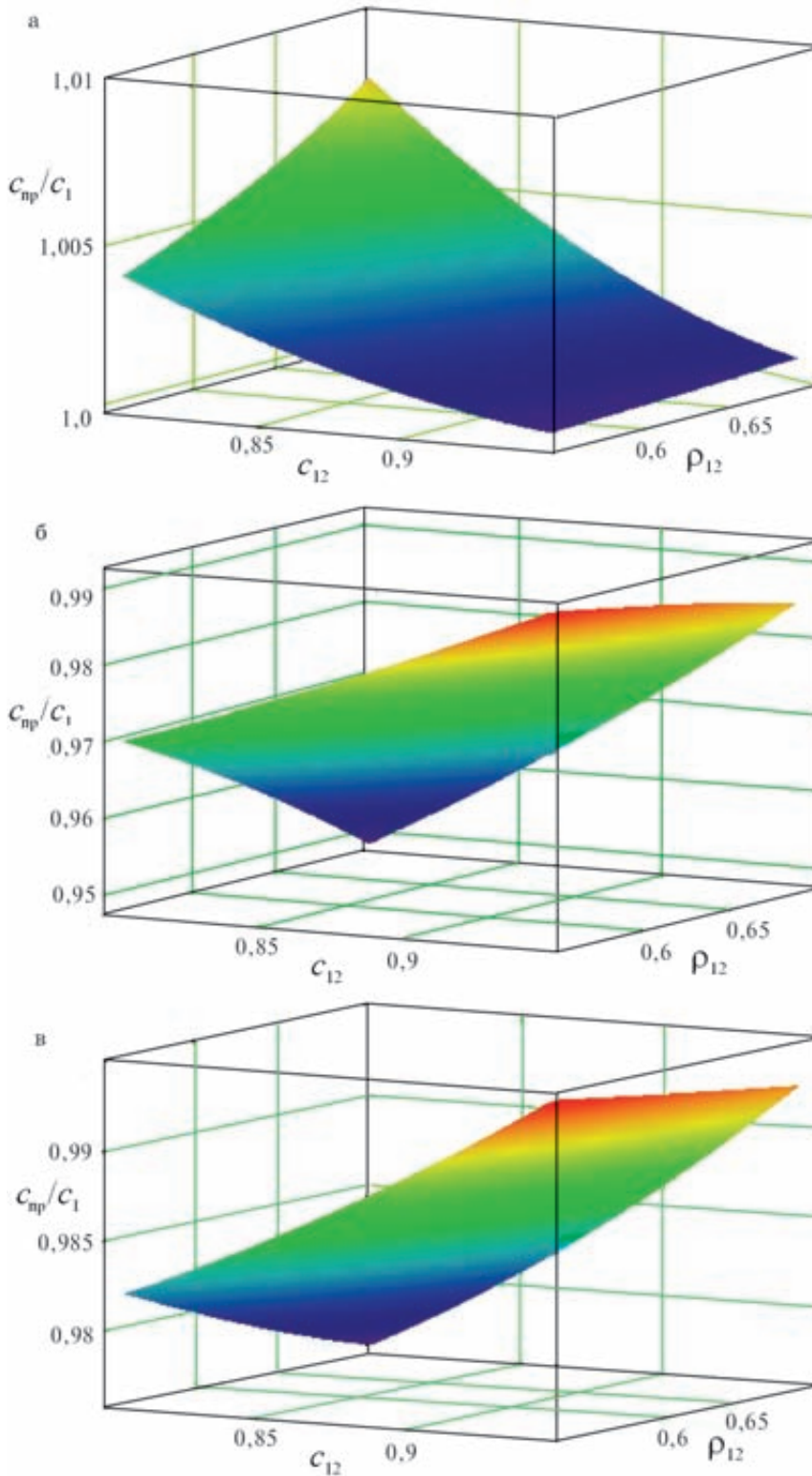


Рис. 8. Зависимость нормированной скорости распространения придонной волны от параметров морского дна: а – формула (1), б – формула (2), в – формула (3)

ческих дальномерных систем с использованием алгоритмов (1, 2) защищены патентами [12-15]. Там же приведён и необходимый для этого набор па-

раметров, включающий в себя параметры сопряжённых сред $\rho_1, c_1(h), \rho_2, c_2(h)$, измеряемые вблизи границы раздела, групповое время задержки рабочего

сигнала, измеряемое по времени прихода максимума амплитуды рабочего сигнала, угол рефракции лучей в придонной области, измеряемый с помощью донного векторного приёмника, и инвариантное соотношение между фазовой и групповой скоростью [16], характерное для придонного звукового канала мелкого моря, в котором скорость распространения придонной волны играет роль инвариантной скорости.

Погрешность измерения расстояний с помощью акустических дальномерных средств непосредственно связана с погрешностью определения скорости распространения придонной волны по необходимому набору измеряемых параметров, а также с устойчивостью (инвариантностью) используемых алгоритмов в условиях априорной неопределённости параметров среды и условий распространения. Сама проблема уменьшения относительной погрешности измерения расстояний до величин порядка 10^{-3} требует дальнейших исследований, теоретических и экспериментальных, придонной волны как доминирующей составляющей в звуковом поле в придонной области.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

По результатам анализа придонной структуры звукового поля и особенностей распространения звуковых волн в пограничной области морского дна можно сделать следующие выводы.

Теоретический анализ звукового поля вблизи морского дна, выполненный в рамках несамопряжённой модельной постановки, предсказывает существование придонной волны пограничного типа, образованной тремя парциальными составляющими: водной волной, грунтовой волной и обобщённой

нормальной волной, соответствующей полюсу коэффициента отражения.

Сложная структура придонной волны находит своё подтверждение в существовании крупномасштабных интерференционных структур, которые регулярно обнаруживаются при локационной съёмке морского дна локатором бокового обзора, установленным на АНПА. Все особенности интерференционных структур хорошо соответствуют выводам обобщённой теории, но не имеют адекватного объяснения в классической теории.

Прямые измерения кинематических характеристик придонной волны в условиях акустического полигона, вы-

полненные при надлежащем метрологическом обеспечении, хорошо подтверждают выводы теории. Скорость её распространения близка к скорости звука в воде вблизи дна и не зависит от частоты в исследованном диапазоне частот. Оптимальным для её селективного возбуждения является вертикально ориентированный донный излучатель с дипольной структурой функции возбуждения, характеристика направленности которого имеет максимум в диапазоне углов скольжения 10–15°. Полный набор характеристик этого достаточно уникального излучателя приведён в работе [8].

Придонная волна, скорость распространения которой не имеет частотной зависимости,

позволяет совершенно иначе подойти к проблеме разработки гидроакустических средств навигационного обеспечения и средств гидроакустической связи для АНПА дальнего радиуса действия, работающих вблизи морского дна, как это предложено в [12–15], и соответственно повысить эффективность их использования.

Авторы благодарят сотрудников отдела прикладной гидроакустики ИПМТ ДВО РАН Ю.Г. Ларионова, Ю.В. Матвиенко, А.В. Ковалева, Ю.В. Карпова, Е.А. Гетмана, принимавших активное участие в проведении экспериментальных работ по исследованию придонной волны в реальных условиях морского эксперимента.

ЛИТЕРАТУРА

1. Касаткин Б.А., Злобина Н.В., Касаткин С.Б. Аномальные свойства звуковых полей вблизи морского дна. Часть 1 // Подводные исследования и робототехника. 2010. № 1(9). С. 4–13.
2. Касаткин Б.А., Злобина Н.В. Эффект самофокусировки ненаправленного акустического излучения в слоистых средах // ДАН. 2010. Т. 432, № 5. С. 681–684.
3. Касаткин Б.А., Злобина Н.В. Пограничные волны на границе раздела вода–морское дно // ДАН. 2010. Т. 433, № 3. С. 403–405.
4. Касаткин Б.А., Злобина Н.В. Несамосопряжённая модельная постановка граничной задачи Пекериса // ДАН. 2010. Т. 434, № 4. С. 540–543.
5. Tolstoy I., Usdin E. Wave propagation in elastic plates: Low and high mode dispersion // J. Acoust. Soc. Amer. 1957. V. 29, № 1. P. 37–42.
6. Ali H.B., Bibee L.D. The influence of sediment layering and geoaoustics on the propagation of Sholte interface waves // Proceeding of Ocean's-93. V. 1. P. I-105 – I-113.
7. Padilla F., De Billy M., Quentin G. Theoretical and experimental studies of surface waves on solid-fluid interfaces when the value of the fluid sound velocity is located between the shear and the longitudinal ones in the solid // J. Acoust. Soc. Am. 1999. V. 106(2). P. 666–673.
8. Касаткин Б.А., Злобина Н.В. Корректная постановка граничных задач в акустике слоистых сред. М: Наука, 2009. 496 с.
9. Касаткин Б.А. Аномальные явления при распространении звуковых волн вблизи морского дна // Акуст. ж. 2002. Т. 48, № 4. С. 437–446.
10. Агеев М.Д., Киселев Л.В., Матвиенко Ю.В. и др. Автономные подводные роботы. Системы и технологии / Под ред. акад. М.Д. Агеева М: Наука, 2005. С. 192–196.
11. Злобина Н.В., Касаткин Б.А., Матвиенко Ю.В., Рылов Р.Н. Физические основы и метрологическое обеспечение гидроакустической дальнометрии в мелком море // Приборы. 2006. № 11. С. 55–60.
12. Патент 2311662 РФ, МПК G01S 15/08 (2006/01). Способ измерения расстояния до контролируемого объекта. – № 2006117740/28; заявл. 23.05.2006; опубл. 27.11.2007, Бюл. № 33.
13. Патент № 2311663 РФ, МПК G01S 15/08 (2006/01). Способ измерения расстояния до контролируемого объекта. – № 2006118489/28; заявл. 29.05.2006; опубл. 27.11.2007, Бюл. № 33.
14. Патент № 2313802 РФ, МПК G01S 15/08 (2006/01). Способ измерения расстояния до контролируемого объекта. – № 2006129406/28; заявл. 14.08.2006; опубл. 27.12.2007, Бюл. № 36.
15. Патент № 2313803 РФ, МПК G01S 15/08 (2006/01). Способ измерения расстояния до контролируемого объекта. – № 2006129707/28; заявл. 16.08.2006; опубл. 27.12.2007, Бюл. № 36.
16. Касаткин Б.А., Косарев Г.В. Физические основы акустической дальнометрии // Вестник ДВО РАН. 1998. № 3. С. 41–50.