

УДК 534.23: 629.127

# АНОМАЛЬНЫЕ СВОЙСТВА ЗВУКОВЫХ ПОЛЕЙ ВБЛИЗИ МОРСКОГО ДНА

## Часть 1

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

Институт проблем морских  
технологий ДВО РАН<sup>1</sup>

Представлен обзор экспериментальных данных, связанных с отражением и преломлением звуковых волн на границе раздела вода–морское дно, которые не находят объяснения в рамках классической теории и считаются аномальными. Для объяснения экспериментальных результатов аномального характера предложена несамосопряженная модельная постановка граничных задач на отражение сферической волны в слоистой среде, которая адекватна экспериментальным данным. В соответствии с предложенной модельной постановкой выполнены теоретические расчеты, которые не только объясняют экспериментальные данные аномального характера, но и предсказывают эффект самофокусировки звукового поля на оси симметрии в полупространстве, появляющийся при участии сходящейся волны отдачи. Приведены экспериментальные результаты профилирования морского дна, подтверждающие выводы теории. Отмечается важность правильного описания пограничных волновых процессов, оказывающих существенное влияние на работу гидроакустических систем автономных необитаемых подводных аппаратов, работающих вблизи морского дна.

### ■ ВВЕДЕНИЕ

Морская среда как арена действия автономных необитаемых подводных аппаратов (АНПА) является достаточно сложным по своим гидрофизическим характеристикам объектом, определяющим эффективность использования самих АНПА. Основным и, пожалуй, единственным информационным каналом связи с АНПА и единственным инструментом исследования морской среды и морского дна в прикладных задачах различного типа, решаемых с использованием АНПА, являются звуковые волны, хорошо распространяющиеся в морской среде.

Классическая теория распространения звуковых волн в морской среде получила мощный стимул для своего развития в послевоенные годы, когда закладывались основы стратегического атомного подводного флота, и представляет в настоя-

щее время достаточно сложную систему знаний, объединённых общим названием «Акустика океана». Фундаментом этой системы знаний служат классический закон отражения и преломления звуковых лучей на границах раздела различных сред, известный как закон Снелля, классическая гипотеза Ньютона о полном внутреннем отражении при углах падения, больших критического, и классическая теория нормальных волн в слоистых средах, разработанная в пионерных работах [1-3] и в последующих многочисленных работах отечественных и зарубежных учёных. Понятно, что существенный вклад в общую систему знаний внесли и не менее многочисленные экспериментальные данные, полученные в различных экспедициях в условиях реальной морской среды.

Как оказалось, к настоящему времени накопилось до-

статочно большое количество экспериментальных данных, которые либо не имеют адекватного объяснения в рамках классической теории, либо прямо противоречат ей. В первую очередь это относится к пограничным явлениям, которые имеют место вблизи границы раздела вода–морское дно. Пограничные явления, в свою очередь, существенно влияют на работу таких систем, как гидроакустические навигационные системы дальнего радиуса действия, гидроакустические системы связи и телеметрии, гидролокационные средства зондирования верхнего слоя морского дна и его поверхности, такие как акустический профилограф и гидролокатор бокового обзора. Но все перечисленные системы являются основными источни-

<sup>1</sup> 690091, Владивосток, ул. Суханова, 5а, тел.: (4232)432578, e-mail: kasatkas@marine.febras.ru

ками информации для АНПА и определяют эффективность его работы, поэтому правильность описания и понимания пограничных явлений приобретает первостепенное значение. Поясним сказанное простыми примерами.

**■ Экспериментальные данные, полученные при измерении коэффициента отражения**

Хорошо известно, что самой простой, но достаточно информативной характеристикой границы раздела вода–морское дно является коэффициент отражения, например по давлению, и его угловая зависимость. Эта характеристика вычисляется в рамках модельной задачи на отражение и преломление плоской волны, хотя всем понятно, что плоских волн в природе не существует. Полученные в этой модельной задаче результаты экстраполируются на более сложный случай отражения и преломления сферической волны, которая допускает представление в виде интегральной суммы плоских волн. Этот шаг и является самым важным, поскольку сферические волны в отличие от плоских волн существуют реально, а не на бумаге в математическом описании.

Соответствующая граничная задача на отражение сферической волны на границе раздела двух жидких сред была решена Л.М. Брежовских в работе [4] в 1948 г. Само решение считается классическим, которое обычно трактуется как единственно возможное, а заодно и единственно правильное. На основе полученного решения был сделан вывод о том, что отражение по любой спектральной составляющей сферической волны является зеркальным, а коэффициент отражения в зеркальном направлении равняется коэффициенту отражения плоской волны (в том же направлении). Все последующие работы по экспериментальной проверке закона отражения сферической волны проводились на этой теоретической основе, поскольку другой основы просто не существовало. На рис. 1 представлена угловая зависимость коэффициента отражения плоской волны для морского дна песчаного типа (1) и типа осадочных неконсолидированных пород (2), частотной зависимости коэффициент отражения плоской волны не имеет.

Можно отметить хорошо известные особенности угловой зависимости, которые заключаются в том, что коэффициент отражения по потоку мощности

не превышает 5–10% в достаточно широком диапазоне углов падения, близких к нормальному, и только при углах падения, больших критического, отражение становится полным. Здесь же отметим, что в соответствии с гипотезой Ньютона полное отражение может быть только внутренним, т.е. должно быть связано с затеканием энергии звукового поля на горизонт полного внутреннего отражения с последующим возвратом. Сама гипотеза также считается классической, хотя за прошедшие триста лет она не получила ни физического, ни математического обоснования.

Экспериментально полученная частотная зависимость коэффициента отражения (по давлению) сферической волны при нормальном падении для морского дна в районах абиссальных равнин приведена на рис. 2. Отметим, что эти результаты получены в различных экспедициях, различными авторскими коллективами, но по единой методике, которая является самой простой для случая нормального падения. Кроме того, результаты получены в условиях глубокого моря и для морского дна осадочного типа, которое также является типичным для глубокого моря. Морское дно в районах абиссальных равнин отклоняется от горизонтального на

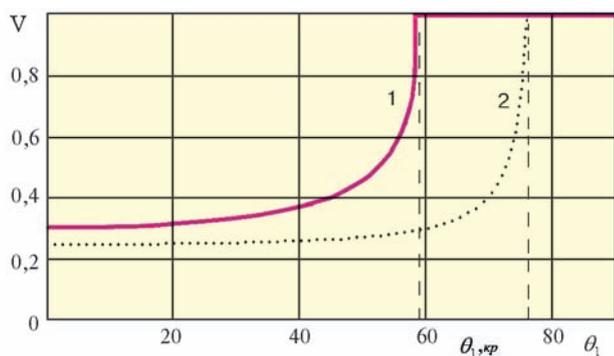


Рис. 1. Зависимость коэффициента отражения плоской волны от угла падения. 1 – граница раздела вода–морской песок, 2 – граница раздела вода–осадочный слой

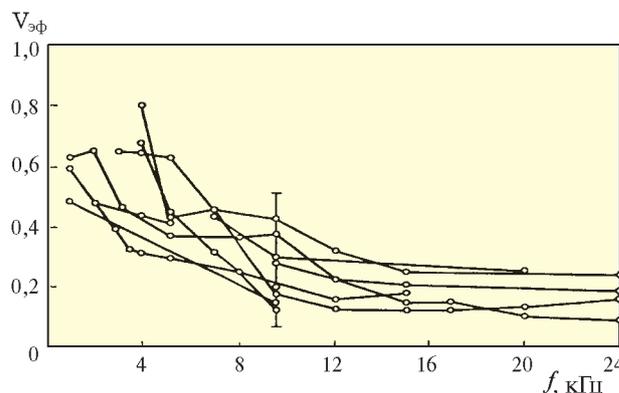


Рис. 2. Частотная зависимость эффективного коэффициента отражения при нормальном падении в районах с выровненным дном

десяти доли градуса, т.е. является практически горизонтально плоским. Все результаты многократно опубликованы, например, в работах [5-7]. Понятно без особых пояснений, что экспериментальные результаты приближаются к теоретической оценке только на достаточно высоких частотах, но на низких частотах (килогерцового диапазона) экспериментальный коэффициент отражения, например по потоку мощности, является аномально большим и на порядок отличается от теоретической оценки.

Как оказалось, коэффициент отражения сферической волны можно измерить достаточно просто и в предельном случае

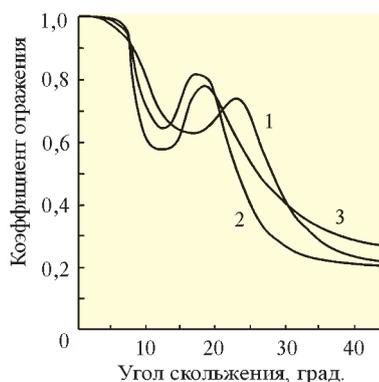


Рис. 3. Экспериментальные зависимости коэффициента отражения от угла скольжения; 1 –  $f = 64$  Гц, 2 –  $f = 100$  Гц, 3 –  $f = 128$  Гц

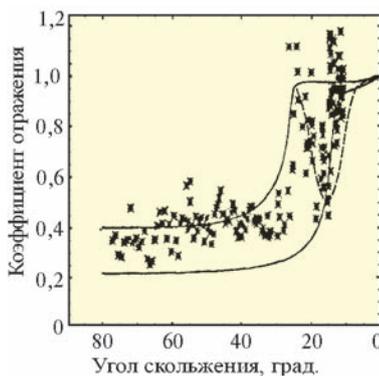


Рис. 4. Экспериментальные и теоретические зависимости коэффициента отражения; крестики – экспериментальные значения, сплошная линия – классическая теория, пунктирная линия – обобщённая теория

малых углов скольжения, т.е. в диапазоне закритических углов падения. Сразу же оговоримся, что простых ситуаций с измерениями в реальных морских условиях не бывает, но могут быть условия, при которых погрешность измерения достаточно мала и находится в разумных пределах. Соответствующая методика для глубокого моря была предложена Н.В. Студеничником в работе [8] для случая приповерхностного расположения излучателя и приёмного гидрофона. Совершенно другая методика измерения коэффициента отражения была предложена канадским учёным Дж. Хёрдом в работе [9] для случая придонного расположения излучателя и приёмной антенны в глубоком море, но в том же низкочастотном диапазоне (порядка первой сотни Герц). Результаты экспериментальной оценки коэффициента отражения поясняются рис. 3 и рис. 4.

Характерное отличие экспериментальных результатов от теоретической оценки в обоих случаях несмотря на различие экспериментальных методик заключается в том, что коэффициент отражения принимает аномально малые значения при углах скольжения 10–15°. Экспериментальная оценка оказалась вдвое меньше теоретической, что, казалось бы, нарушает само понятие полного отражения. С другой стороны, неполное отражение, возможно, как раз и свидетельствует о внутреннем характере отражения, которое предполагает затекания энергии звукового поля на горизонт полного внутреннего отражения с последующим возвратом, т.е. в полном соответствии с гипотезой Ньютона. Иначе говоря, внутреннее отражение, по Ньютону, возможно только при неполном отражении в диапазоне углов максимального энергообмена между полупространствами. Но при

таком энергообмене отличен от нуля только локальный поток мощности, тогда как усреднённый поток мощности равен нулю, как и должно быть в диапазоне закритических углов падения.

Многочисленные попытки измерения коэффициента отражения сферической волны на границе раздела вода–морское дно при произвольных углах падения на различных частотах, описанные в монографиях [7, 10], свидетельствуют лишь о существенной вариабельности результатов измерения. Таким образом, общий итог сопоставления экспериментальных результатов с теоретическими выглядит совершенно неутешительным. Поскольку физическую природу отражения сферических волн, которую проясняет для нас натуральный эксперимент, изменить нельзя, да и физическая модель сопряжённых сред на границе раздела вода–морское дно выглядит достаточно правдоподобно, то изменять надо математическую модель, описывающую процесс отражения. Но именно этот вывод воспринимается как совершенно невероятный среди акустиков–профессионалов, интуитивно считающих классическое решение единственно возможным, а заодно и единственно верным.

### ■ Новый подход к постановке и решению граничных задач

Как показал подробный анализ классического решения, выполненный нами в работе [11], оно имеет целый ряд особенностей, которые непосредственно связаны с принятой модельной постановкой. Сама модельная постановка известна как самосопряжённая модельная постановка (СМП), применяющаяся, как правило, для описания консервативных систем, в которых

отсутствуют какие-либо потери энергии. Однако морская среда с источником энергии, контактирующая с морским дном, представляет собой открытую систему, в которой неизбежны потери энергии на излучение в морское дно при углах падения, меньших критического. Об этом достаточно убедительно свидетельствует угловая зависимость коэффициента отражения плоских волн, интегральной совокупностью которых является волна сферическая. Оказывается, в самосопряжённой модельной постановке излучение в нижнее полупространство лишь имитируется системой мнимых источников распределённого типа, которые появляются на оси симметрии в нижнем полупространстве. Эти источники, входящие в состав функции Грина слоистого пространства, блокируют поток мощности заданного источника так, что суммарный поток мощности через импедансную границу раздела равен нулю при всех углах падения, включая докритические.

Другими словами, выбранное модельное описание действительно описывает нашу систему как консервативную систему без потерь, но эта модель представляется совершенно некорректной, по крайней мере в физическом плане. Более того, решение оказалось некорректным и в математическом плане как сингулярное на оси симметрии для радиальной компоненты колебательной скорости, которая имеет особенность  $O(r^{-1})$  (где  $r$  – цилиндрический радиус) на всей оси симметрии, т.е. в области определения. Из физических соображений, которые невозможно опровергнуть ссылками на приближённость модельного описания, радиальная компонента колебательной скорости в осесимметричной системе должна обращаться в нуль всюду на оси симметрии, за исключением

самого источника. Все эти особенности изначально заложены в самосопряжённую модельную постановку, которая понравилась всем без исключения своей кажущейся простотой, но, увы, эта особенность оказалась единственным полезным её достоинством.

Альтернативой классической является самосопряжённая модельная постановка (НМП), которая всегда должна использоваться для корректного описания неконсервативной системы с потерями любого вида. Формальный учёт физических потерь на затухание в среде формализован достаточно давно и для их учёта можно было бы и не вводить самосопряжённую модельную постановку как самостоятельную, используя вместо неё хорошо известный принцип предельного поглощения. В то же время потери на излучение через импедансную границу раздела, т.е. через механизм преломления в области докритических углов падения, оказались весьма специфическими в модельном описании. Такими же специфическими особенностями обладает и механизм полного внутреннего отражения, который предполагает энергообмен между верхним полупространством с источником и нижним полупространством – с нагрузкой. Однако при этом локальный поток мощности через границу раздела должен быть отличен от нуля, а усреднённый поток мощности должен равняться нулю, по крайней мере, если размер усредняющего окна достаточно велик по сравнению с длиной волны. Впервые самосопряжённая модельная постановка граничной задачи на отражение сферической волны была предложена нами в работе [11] и детально исследована в монографии [12], а соответствующая ей теория отражения была названа обобщённой в отличие от классической.

Принципиальную основу такой постановки составляют два положения. Первое из них касается отказа от условий локальной непрерывности решения по давлению и нормальной компоненте колебательной скорости на границе раздела, т.е. от условий локальной  $(p, v_z)$  – непрерывности при сохранении  $(p, v_z)$  – непрерывности в среднем, если размер усредняющего окна достаточно велик по сравнению с длиной волны. Отказ от условий локальной непрерывности при сохранении непрерывности в суммарном поле (т.е. в среднем) позволяет ввести в суммарное решение сходящиеся волны отдачи, гарантирующие обращение в нуль радиальной компоненты колебательной скорости на оси симметрии во всей области определения, за исключением источника. При этом решение оказывается корректным (ограниченным) в области определения. На оси симметрии поле приобретает характер стоячей волны, но в дальней зоне суммарное поле носит характер расходящихся волн, удовлетворяющих условиям излучения Зоммерфельда.

Второе условие формулируется как условие неотрицательности усреднённого потока мощности через импедансную границу раздела. Усреднённый поток мощности должен быть положительно определённым при докритических углах падения и равен нулю при закритических углах падения. Этих основных положений оказалось достаточно, чтобы описать и частотную зависимость коэффициента отражения сферической волны, и скорректировать угловую зависимость. Скорректированный вид частотно-угловой зависимости коэффициента отражения сферической волны для границы раздела вода–морское дно песчаного типа поясняется рис. 5.

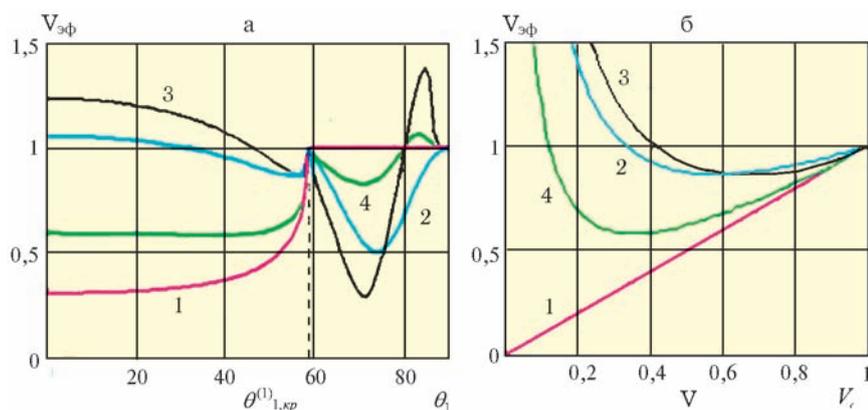


Рис. 5. Угловая зависимость коэффициентов отражения (а): 1 –  $V$ , 2 –  $\langle V_{cf} \rangle$ , 3 –  $V_{cf}^{(nc)}$ , 4 –  $V_{cf}^{(sc)}$ ; соотношение между коэффициентами отражения сферической волны и плоской волны при  $\theta_i \leq \theta_{i,cr}^{(1)}$  (б): 1 –  $V_{cf} = V$ , 2 –  $\langle V_{cf} \rangle$ , 3 –  $V_{cf}^{(nc)}$ , 4 –  $V_{cf}^{(sc)}$  для границы раздела вода–морское дно осадочного типа

На рис. 5,а частотная зависимость представлена высокочастотным приближением (кривая 4), низкочастотным приближением (кривая 3), усреднённой зависимостью коэффициента отражения плоской волны (кривая 2) и угловой зависимостью коэффициента отражения плоской волны (кривая 1). Рис. 5,б поясняет амплитудное соотношение между коэффициентами отражения плоской и сферической волн в области докритических углов падения. Можно отметить, что несамосопряжённая модельная постановка правильно описывает низкочастотное увеличение коэффициента отражения сферической волны при малых углах падения и существенное уменьшение коэффициента отражения в области углов полного внутреннего отражения. При малых углах падения коэффициент отражения может принимать значения, превышающие единицу. Однако положительная определённость потока мощности через импедансную границу раздела гарантируется и в этом случае. Теоретические кривые, соответствующие самосопряжённой модельной постановке для морского дна песчаного типа и типа осадочных неконсолидированных пород приведены на рис. 4 для срав-

нения с экспериментальными данными. Там же приведена и кривая, соответствующая несамосопряжённой модельной постановке. Можно отметить, что обобщённая теория отражения сферических волн в несамосопряжённой модельной постановке даёт качественно новые результаты, которые хорошо соответствуют экспериментальным данным, и именно в той их части, которая относилась к аномальным особенностям, противоречащим классической теории.

### ■ Эффект самофокусировки

Физическая причина существенного увеличения коэффициента отражения сферической волны в области малых углов падения связана со сходящейся волной отдачи, которая нарушает принцип зеркальности отражения по всем спектральным составляющим сферической волны. Лучевая трактовка волны отдачи в области докритических углов падения поясняет рис. 6.

Сходящаяся волна отдачи, распространяясь в сторону оси симметрии, отражается от неё как от жёсткой границы расходящейся волной, а потому

должна учитываться в суммарном поле расходящихся волн. Интегральная сумма сходящихся волн отдачи формирует характерную каустику, т.е. зону повышенного давления, в ближнем поле излучателя в полупространстве. Один конец этой каустики выходит на границу раздела в точке, соответствующей критическому углу падения, а другой конец выходит на ось симметрии, создавая там характерное фокальное пятно. С понижением частоты все лучи, отражённые от каустики, становятся синфазными, что и ведёт к низкочастотному увеличению коэффициента отражения при малых углах падения. Каустическая особенность принципиально меняет характер преломлённой сферической волны. Её амплитуда остаётся аномально большой только в придонном слое, ограниченном снизу горизонтом, соответствующим фокальному пятну, а ниже этого горизонта амплитуда преломлённой сферической волны резко убывает. Результаты моделирования звукового поля излучателя, работающего в мелком море при различном удалении от дна, поясняются рис.7 для частотного параметра  $k_1 h = 100$  и различных положений источника.  $z_{01} = z/h$  – нормированная горизонтальная координата источника. Вертикальные разрезы звукового поля на оси симметрии в полупространстве поясняются рис. 8.

Для экспериментальной проверки самого эффекта возникновения сходящейся волны отдачи и связанного с этим эффекта фокусировки нужно было бы провести специальный эксперимент с приёмником, находящимся в грунте. К счастью, такие эксперименты проводились в работах [13, 14] с целью изучения аномальных особенностей преломления и отражения звуковых волн от морского

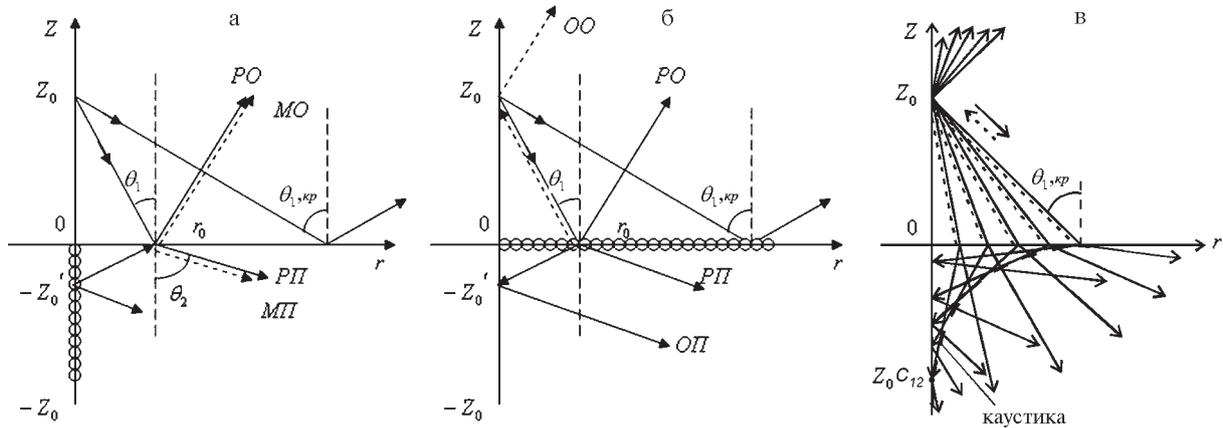


Рис. 6. Лучевая трактовка отражения и преломления сферической волны на импедансной границе раздела: а – классическое решение, б – обобщённое решение, в – фокусировка излучения на оси симметрии в полупространстве. РО, МО, ОО, РП, МП, ОП – регулярный, мнимый, обобщённый отражённые и преломлённые лучи соответственно,  $z_0$  – горизонт источника,  $c_{12}$  – отношение скоростей звука в воде и морском дне, кружочками обозначены мнимые источники

дна. Эти эксперименты проводились в условиях акустического бассейна, на дно которого наносился слой песка, имитирующего морское дно. Широкополосный ненаправленный излучатель располагался на тележке, которая могла перемещаться относительно приёмных гидрофонов, закопанных в грунт на различную глубину. Проходные характеристики, соответствующие такому экспе-

рименту, приведены на рис. 9 в виде зависимости времени распространения и амплитуды импульсного отклика от горизонтального расстояния между излучателем и приёмником.

Рис. 9,а соответствует ровному дну, рис. 9,б соответствует взрылённому дну, для которого высота неровностей была соизмерима с длиной волны на средней частоте эксперимента 50 кГц. Длительность импульса

излучения составляла не более периода на средней частоте. Экспериментальные проходные характеристики убедительно свидетельствуют о существенном уширении импульсного отклика при соосном расположении излучателя и приёмного гидрофона, которое можно объяснить или донной реверберацией, связанной с обратным рассеянием на неровной границе дна, либо сходящейся волной отдачи.

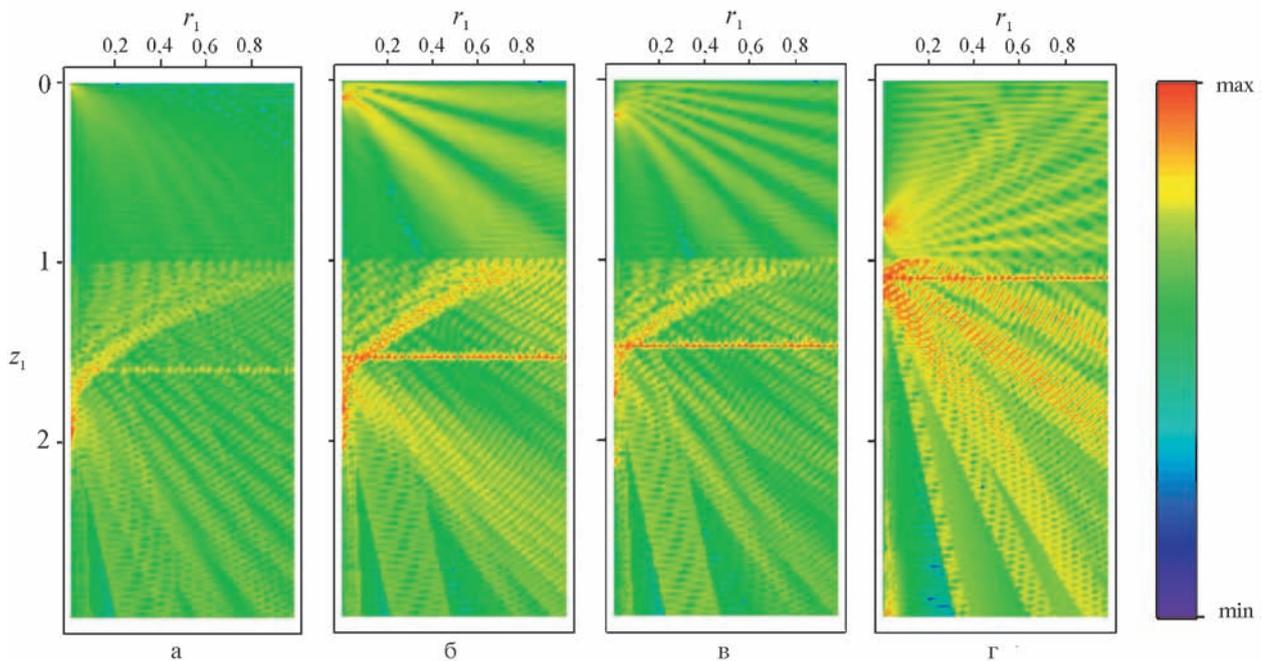


Рис. 7. Структура звукового поля вблизи оси симметрии при различных значениях горизонта излучения,  $k_1 h = 100$ ; а –  $z_{01} = 0,001$ ; б –  $z_{01} = 0,1$ ; в –  $z_{01} = 0,2$ ; г –  $z_{01} = 0,8$

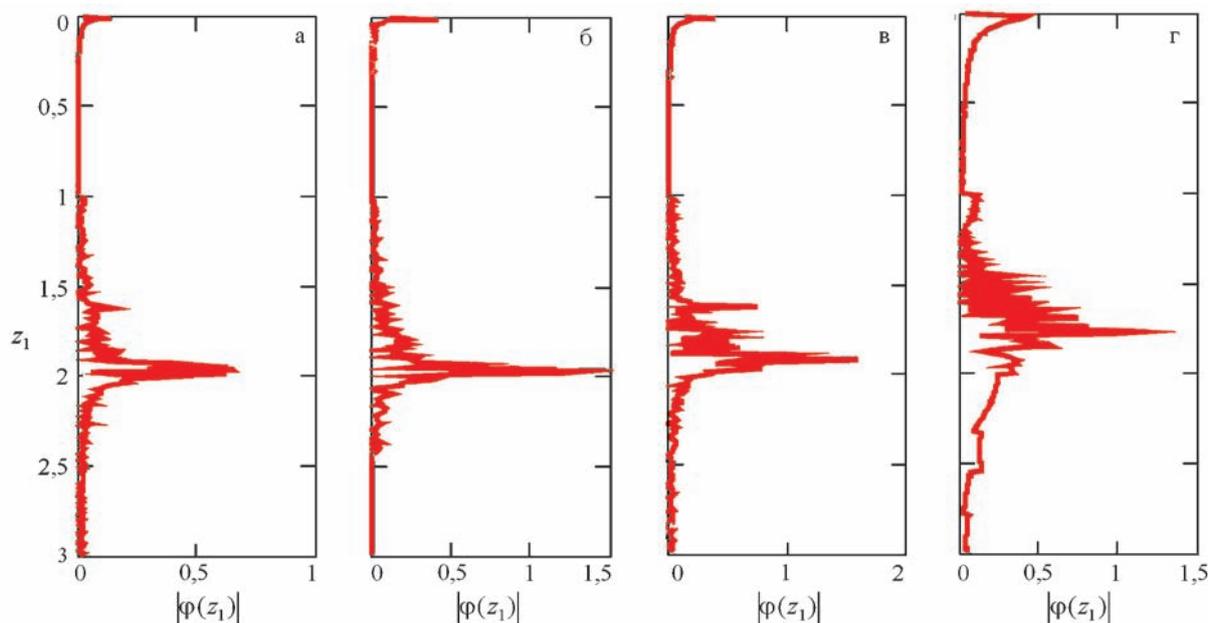


Рис. 8. Вертикальные разрезы звукового поля  $|\varphi(z_1)|$  на оси симметрии при различных значениях частотного параметра;  $z_{01} = 0,001$ : а –  $k_1h = 50$ , б –  $k_1h = 100$ , в –  $k_1h = 200$ , г –  $k_1h = 400$

Однако импульсный отклик, изображённый на рис. 9,б для существенно неровного дна, практически ничем не отличается при соосном расположении излучателя и приёмника от аналогичного отклика, измеренного для ровного дна и изображённого на рис. 9,а. Фактическое уширение импульсного отклика сходящейся волной отдачи увеличивает его суммарную

длительность в два - три раза по сравнению с длительностью самого импульса возбуждения, что можно считать экспериментальным подтверждением существования сходящейся волны отдачи. В математическом плане именно сходящаяся волна отдачи гарантирует обращение в нуль радиальной компоненты колебательной скорости на оси симметрии в полупространстве

и корректность (ограниченность) решения во всей области определения.

■ **Влияние эффекта самофокусировки на работу акустического профилографа**

Обобщённая теория отражения сферических волн от морского дна позволила совершенно иначе взглянуть на работу акустического профилографа, установленного на борту АНПА. Для увеличения глубины профилирования излучатель профилографа делают достаточно низкочастотным, а следовательно, слабонаправленным, что ухудшает разрешающую способность профилографа. Однако глубина профилирования определяется не только (и не столько) энергетическими возможностями излучателя, но и структурой преломлённой сферической волны в донном полупространстве. В соответствии с выводами обобщённой теории звуковое поле в полупространстве вблизи оси симметрии изменяется существенно немонотонно. Уровень звукового

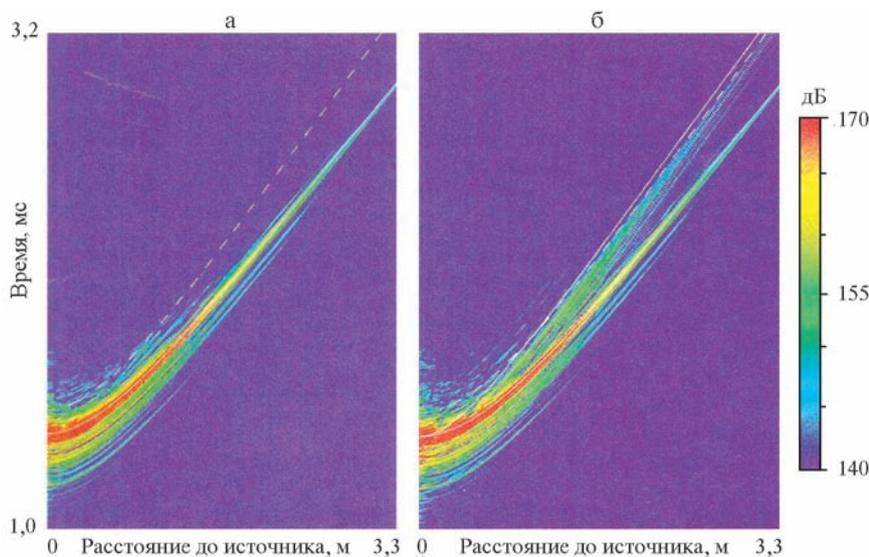


Рис. 9. Проходные характеристики, измеренные при высоте излучателя над дном 0,5м и глубине приёмного гидрофона 0,45м: при выровненной поверхности дна (а), при взрылленной поверхности дна (б)

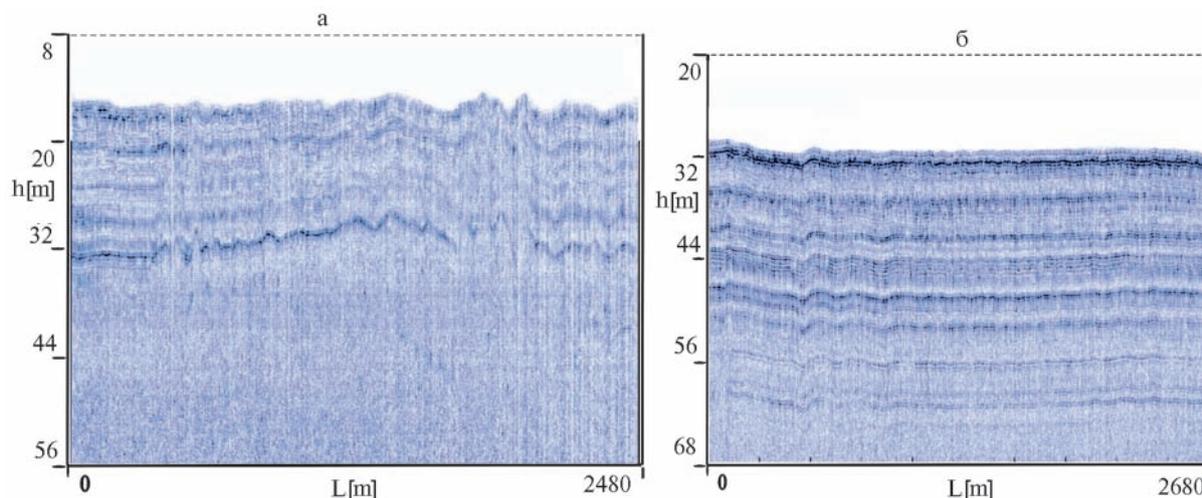


Рис. 10. Профилограммы морского дна, полученные при расстоянии от антенны профилографа до морского дна 15 м (а) и 30 м (б) в одном и том же районе профилирования

давления значителен вблизи акустики вплоть до горизонта фокусировки поля, а затем резко убывает. Это означает, что глубина профилирования фактически определяется горизонтом фокусировки, который, в свою очередь, является зеркальным отображением реального источника относительно донной границы раздела. Увеличивая высоту излучателя профилографа над морским дном, мы увеличиваем и потенциальную глубину профилирования, определяемую структурой звукового поля. Однако при этом увеличиваются и потери на распространение, связанные с затуханием звука в осадочных породах морского дна. Компромиссное решение должно находиться с учётом обоих этих факторов.

На рис. 10 приведены две профилограммы морского дна, полученные при работе АНПА, созданного в институте проблем морских технологий ДВО РАН, на хребте Ломоносова в Северном Ледовитом океане в арктической экспедиции 2007 г. Профилограмма, изображённая на рис. 10, а, получена при высоте излучателя над дном 15 м, профилограмма, изображённая на рис. 10, б, получена при высоте

излучателя над дном 30 м. При подъёме излучателя над дном во втором случае естественные потери на распространение увеличиваются на 25–30 дБ, однако при этом растёт и выигрыш от эффекта фокусировки звукового поля в верхнем слое морского дна, толщина которого вдвое увеличена по сравнению с первым случаем. Суммарный выигрыш в увеличении глубины прозвучивания и разрешающей способности метода профилирования совершенно очевидны во втором случае. Дополнительный выигрыш в разрешающей способности профилирования, которая составляет 0,5 м во втором случае в сравнении с 1,5–2,0 м в первом случае, можно объяснить специфической структурой волны отдачи.

В соответствии с лучевой трактовкой волны отдачи, которая поясняется рис. 6, волна отдачи в момент зарождения вблизи границы раздела распространяется почти горизонтально вдоль слоистой структуры морского дна, что способствует увеличению разрешения по толщине этой слоистой структуры. Затем волна отдачи разворачивается в вертикальном направлении. Для этого направления

разрешение по толщине будет определяться длительностью импульса излучения, т.е. рабочей полосой частот, но эта величина составляет те самые 1,5–2,0 м.

Иначе говоря, новое модельное описание процессов отражения и преломления сферических волн на реальной границе раздела вода–морское дно даёт нам новое понимание этих процессов. Новое понимание позволяет найти новые способы и алгоритмы обработки информации, получаемой с помощью хорошо известных, казалось бы, систем, таких как акустический профилограф. Новые алгоритмы обработки информации дают возможность улучшить технические характеристики отдельных систем и эффективность функционирования самого АНПА в целом.

#### ■ Новая трактовка классических экспериментов Шоха

Не менее интересны свойства обобщённого описания процесса отражения сферической волны и в области критических углов падения. Новое описание здесь даёт нам новое

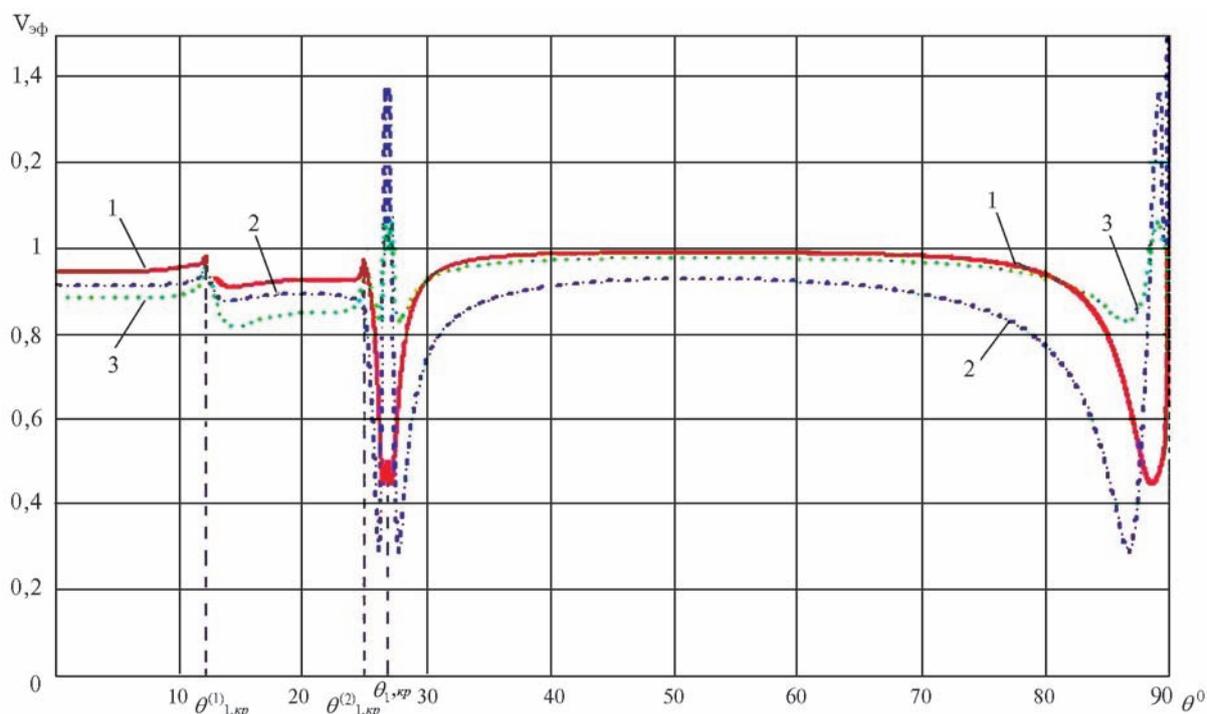


Рис. 11. Угловая зависимость коэффициентов отражения: 1 –  $\langle V_{эф} \rangle$ , 2 –  $V_{эф}^{(мч)}$ , 3 –  $V_{эф}^{(вч)}$  для границы раздела ксилол–алюминий

понимание такого интереснейшего процесса, как полное внутреннее отражение и сдвиг направленных звуковых пучков при отражении. Наиболее полно это явление было изучено в экспериментах Шоха, опубликованных в работе [15]. Сами эксперименты по праву считаются классическими, хотя и не имеют корректного математического описания. Последнее обстоятельство вполне понятно, т.к. само явление невозможно описать в рамках самоспряжённой модельной постановки, а она считается единственно возможной и в этом более сложном случае отражения направленных звуковых пучков на границе раздела жидкость–твёрдое тело (в экспериментах Шоха это граница раздела ксилол–алюминий).

Обобщённая теория отражения и в этом случае даёт интереснейший результат, полностью соответствующий эксперименту. Результаты рас-

чёта коэффициента отражения сферической волны для границы раздела ксилол–алюминий поясняются рис. 11. Традиционно считается, что сдвиг направленных звуковых пучков при отражении связан с комплексностью коэффициента отражения, а величина сдвига определяется производной по волновому числу. Но определённый таким образом сдвиг оказывается бесконечно большим при втором критическом угле и при нулевых углах скольжения. Эксперименты Шоха выявили совершенно иную угловую зависимость сдвига, которая оказалась аномальной (необъяснимой) для классической теории. Выяснилось, что сдвиг имеет место только для угла падения, соответствующего возбуждению волны Рэлея, но не имеет места при других углах падения, включая второй критический. Обобщённая теория описывает именно такую

особенность коэффициента отражения сферической волны в рассматриваемом случае.

Как видно из рис. 11, коэффициент отражения имеет глубокий минимум именно для угла падения, соответствующего возбуждению волны Рэлея, а соответствующий ему коэффициент прозрачности по потоку мощности составляет 85–90%. Высокая энергетическая прозрачность границы раздела, отсутствующая в самоспряжённом модельном описании, реализует потенциально возможный сдвиг направленных пучков при отражении. Она же объясняет аномальную с точки зрения классического описания селективность сдвига по углу падения. Иначе говоря, сдвиг возможен только при наличии энергетической прозрачности границы раздела, а соответствующая теория возможна только в рамках несамоспряжённой модельной постановки.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

По результатам сопоставительного анализа классического и обобщённого решений можно сделать следующие выводы.

1. Обобщённая теория адекватно описывает частотно-угловую зависимость коэффициента отражения сферических волн на импедансных границах раздела и находится в хорошем согласии с экспериментальными данными, которые не имели объяснения в классической теории отражения звуковых волн от морского дна.

2. Обобщённая теория позволила выявить новый эффект самофокусировки звукового поля ненаправленного источника на оси симметрии в полупространстве, который создаётся сходящейся волной отдачи, отсутствующей в классическом решении.

3. Обобщённая теория даёт адекватное объяснение угловой зависимости сдвига направленных звуковых пучков в классических экспериментах Шоха,

которая связана с аномально высокой энергетической прозрачностью границы раздела в области закритических углов падения, отсутствующей в классическом решении.

4. Обобщённая теория позволяет иначе подойти к выбору оптимальных режимов работы установленных на АНПА гидролокационных средств, таких как акустический профилограф и локатор бокового обзора, учитывающих эффекты фокусировки и затекания звукового поля на горизонт полного внутреннего отражения. В свою очередь, учёт этих эффектов позволяет повысить технические характеристики акустических средств и эффективность функционирования самого АНПА.

5. Другая особенность обобщённой теории отражения сферической волны в области закритических углов падения связана с формированием пограничного волнового движения типа придонной волны с перспективными применениями в системах дальней гидро-

акустической навигации и звукоподводной связи, а также в системах томографирования верхнего слоя морского дна на принципиально новой основе. Следует особо подчеркнуть, что все аномальные особенности формирования пограничного волнового движения были экспериментально выявлены с помощью технических средств, установленных на АНПА, разработанных в Институте проблем морских технологий ДВО РАН, во время их опытной эксплуатации. Фактически эти уникальные экспериментальные данные, наиболее полно описанные в монографии [16], и послужили основным стимулом для разработки обобщённой теории волновых процессов в слоистых средах на основе несамопряжённой модельной постановки соответствующих граничных задач.

Авторы выражают благодарность Г.В.Косареву и Ю.Г.Ларионову за участие в подготовке экспериментальных данных по профилированию дна.

## ЛИТЕРАТУРА

1. Pekeris C.L. Theory of propagation of explosive sound in shallow water // *Geol. Soc. Am. Mem.* 1948. № 27.
2. Бреховских Л.М. Волны в слоистых средах. М.: Изд-во АН СССР, 1957. 502 с.
3. Ewing W.M., Jardetzky W.S., Press F. *Elastic waves in layered media.* New York: McGraw-Hill, 1957. 254 p.
4. Бреховских Л.М. Отражение сферической волны от плоской границы раздела двух сред // *ЖТФ.* 1948. Т.18. Вып.4. С.455-472.
5. Воловов В.И. Житковский Ю.Ю. Отражение и рассеяние звука дном океана // *Акустика океана / Под ред. Л. М. Бреховских.* М.: Наука, 1974. С.395-420.
6. Андреева И.Б. Физические основы распространения звука в океане. Л.: Гидрометеиздат, 1975. 192 с.
7. Воловов В.И. Отражение звука от дна океана. М.: Наука, 1993. 270 с.
8. Студеничник Н.В. Исследования коэффициента отражения звука от дна в диапазоне углов полного внутреннего отражения // *Акуст. ж.* 2002. Т. 48. № 4. С. 539-546.
9. Heard G.J. Bottom reflection coefficient measurement and geoaoustic inversion at the continental margin near Vancouver Island with the aid of spiking filters // *J. Acoust. Soc. Amer.* 1997. Vol. 101. № 4. P. 1953-1960.
10. *Акустика дна океана / Под ред. У. Купермана и Ф. Енсена.* М.: Мир, 1984. 452 с.
11. Касаткин Б.А., Злобина Н.В., Касаткин С.Б. Обобщенные волны Рэлея и Шолте на границах раздела слоистых сред // *Акустика неоднородных сред: Сб. тр. школы-семинара под рук. проф. С.А. Рыбака.* Троицк: Изд-во «Тривант», 2008. С. 146-163 (Ежегодник РАО; Вып. 9).
12. Касаткин Б.А., Злобина Н.В. Корректная постановка граничных задач в акустике слоистых сред. М.: Наука, 2009. 496 с.
13. Boyle F.A., Chotiros N. P. Experimental detection of a slow acoustic wave in sediments at shallow grazing angles // *J. Acoust. Soc. Amer.* 1992. V. 91, № 5. P. 2615-2619.
14. Simpson H.J., Houston B.H. Synthetic array measurements of acoustical waves propagating into a water-saturated sandy bottom for a smoothed and roughened interface // *J. Acoust. Soc. Amer.* 2000. Vol. 107, № 5. Pt. 1. P.2329-2337.
15. Schoch A. Seitliche versetzung eines total reflectierten strahles bei ultraschall-wellen // *Acustica.* 1952. Vol. 2, № 17.
16. Агеев М.Д., Киселев Л.В., Матвиенко Ю.В. и др. Автономные подводные роботы. Системы и технологии / Под общ. ред. акад. М.Д. Агеева. М.: Наука, 2005. С.192-196.