АКУСТИЧЕСКИЙ ЖУРНАЛ, 1995, том 41, № 2, с. 296 - 300

УДК 534.2

ВЛИЯНИЕ ГОРИЗОНТА РАЗМЕЩЕНИЯ ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЯ В ВОДНОМ СЛОЕ ШЕЛЬФОВОЙ ЗОНЫ НА УРОВЕНЬ РЕВЕРБЕРАЦИОННОГО СИГНАЛА

© 1995 г. Е. В. Симакина

Акустический институт им. Н.Н. Андреева РАН
117036 Москва, ул. Шверника, 4

Поступила в редакцию 12.07.94 г.

Исследуется изменение уровня реверберационных сигналов в шельфовых районах Средиземного моря и Тихого океана в зависимости от горизонта размещения акустических преобразователей. Показано, что относительный вклад в реверберационный отклик рассеяния на той или иной границе водного слоя шельфовых областей может существенным образом зависеть от гидрологических условий и горизонта размещения преобразователей.

Излучающие устройства стационарных систем подводного наблюдения (как и приемные антенны) обычно располагаются в шельфовых зонах океана, т.е. в сравнительно мелководных районах с наклонным дном. Возникает вопрос, на каком горизонте следует размещать преобразователь в водном слое и как ориентировать лепесток диаграммы направленности, чтобы минимизировать влияния реверберационной помехи. В расчетном плане задача поддается обычно лишь грубым оценкам, поскольку для ее полного решения требуется точное знание топографии дна района, коэффициентов рассеяния и отражения от различных участков дна, зависимости этих коэффициентов от частоты и угла скольжения, не говоря уже о гидрологии и состоянии поверхности. Кроме того, необходима достаточно мощная вычислительная машина для реализации громоздких трехмерных программ расчета.

В настоящее время, как нам кажется, приоритет принадлежит эксперименту, по результатам которого следует пытаться делать обобщающие выводы.

В данной статье проанализированы эксперименты в двух районах Мирового океана: вблизи юго-восточного побережья Средиземного моря и вблизи тихоокеанского побережья Камчатки. Измерялись уровни реверберационных сигналов в определенные моменты времени после излучения зондирующего импульса при различных глубинах размещения акустической антенны и азимутальной ориентации лепестка диаграммы направленности. Как правило, измерения проводились при двух азимутальных углах, при которых ось диаграммы направленности была перпендикулярна генеральной линии изобат и направлена либо в сторону береговой линии, либо в сторону моря.

Остановимся кратко на условиях проведения измерений. Первый район располагался у средиземноморского побережья Египта к северу от Синайского полуострова. Грунт отличался неоднородностью состава и, как следствие, значительной пористостью. В основном это был песчаный ил с примесью большого количества органики (ρ = 1.8 г/см^3). Можно ожидать относительно большого поглощения звука в грунте. Дно было сравнительно плоским с генеральным наклоном к северо-востоку от берега: на отрезке 60 км глубина места менялась от 20 до 400 м. Научно-исследовательское судно, с которого производились измерения, стояло на якоре в центре указанного отрезка. Глубина места H равнялась 85 м. Во время измерений ветровое волнение поверхности достигало 2 баллов; кроме того наблюдалась зыбь с направлением распространения 270° и высотой волны 1 м.

Для гидрологии района во время проведения работ (первая декада апреля) был характерен незначительный изоскоростной слой толщиной около 15 - 20 м и подводный звуковой канал с осью на глубине приблизительно 50 м. Скорость звука у поверхности (1522 м/с) несколько превышала скорость звука у дна (1520 м/с). Соответствующий график зависимости скорости звука c от глубины z представлен на рис. 1.

С борта судна спускался широкополосный преобразователь, работающий в режиме прием-передача. В описываемом эксперименте использовалась антенна со средней частотой 5 кГц и шириной главного лепестка диаграммы направленности в вертикальной и горизонтальной плоскости 12°

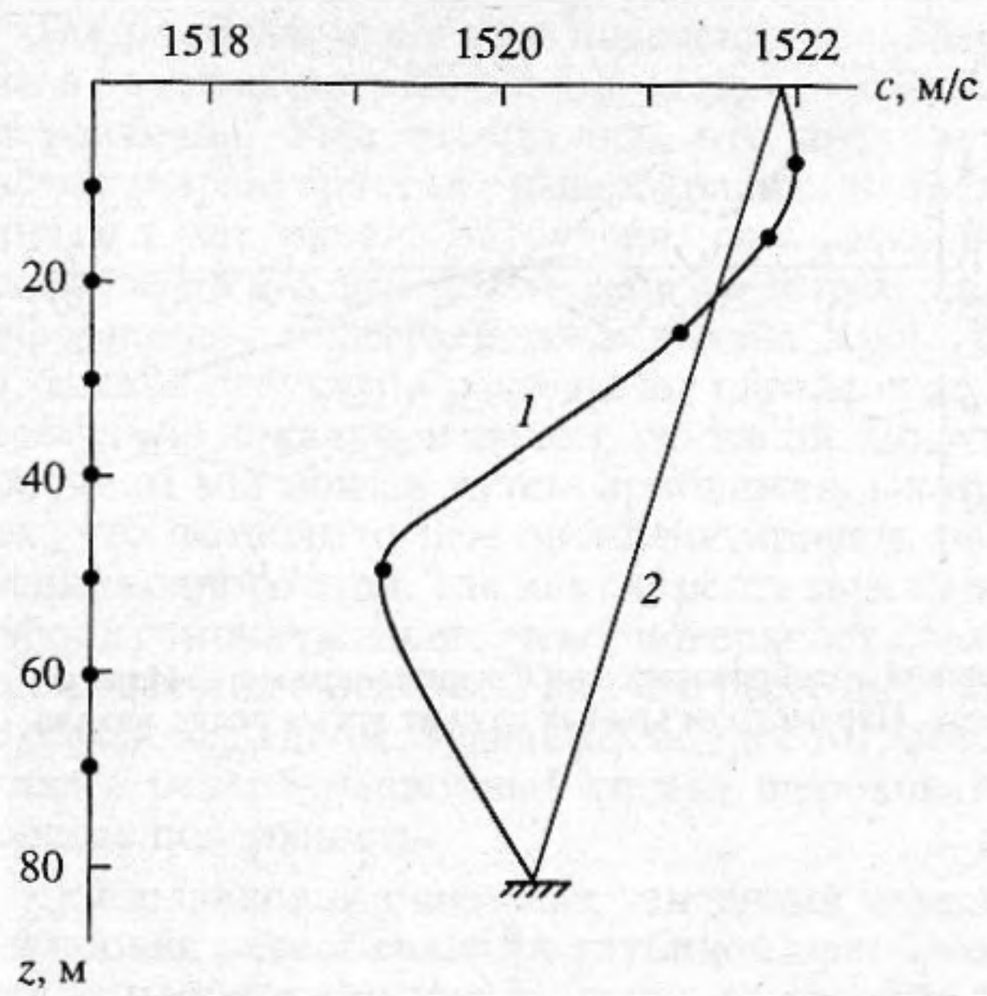

Рис. 1. Условия проведения измерений в Средиземном море: *1* – профиль фактического изменения скорости звука с глубиной $c(z)$, *2* – линейная аппроксимация профиля $c(z)$. Точками на вертикальной оси обозначены глубины проведения измерений.

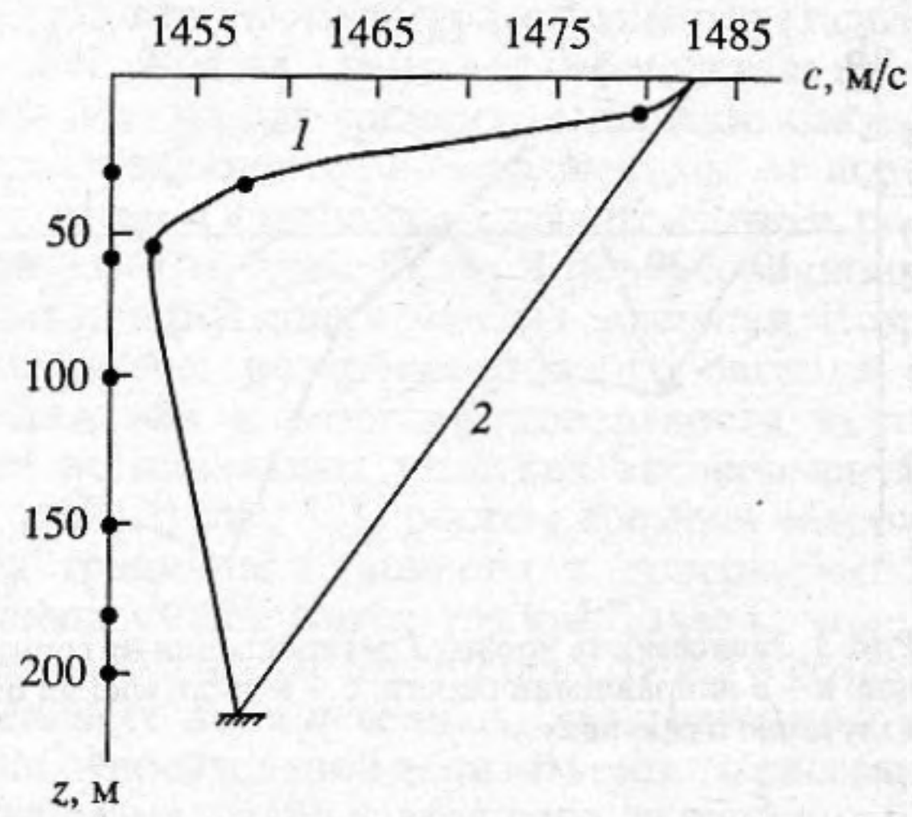

Рис. 2. Условия проведения измерений в Тихом океане: *1* – профиль фактического изменения скорости звука с глубиной $c(z)$, *2* – линейная аппроксимация профиля $c(z)$. Точками на вертикальной оси обозначены глубины проведения измерений.

(по уровню 0.7). Антенна перемещалась по глубине, последовательно занимая горизонты 10; 20; 30; 40; 50; 60; 70 м при нулевом угле наклона оси лепестка диаграммы направленности. На каждом из горизонтов производилось измерение амплитуды реверберации в различные моменты времени после начала зондирующей посылки: излучалось по 20 импульсов псевдошумового сигнала с параметрами: длительность $\tau = 1$ с, средняя частота $f_{ср} = 5$ кГц, полоса частот $\Delta f = 600$ Гц. Из них 10 посылок – при азимутальном угле ($\varphi = 240°$) по направлению к берегу и 10 посылок – в сторону моря ($\varphi = 60°$). Анализировались участки реверберационного отклика, для которых отношение реверберационный сигнал / помеха превышало 2.

Второй район лежал в северо-западной части Тихого океана в шельфовой зоне Камчатки. Глубина места H, где на рейдовой бочке стояло научно-исследовательское судно, составляла 220 м, наклон дна был около 0.5°. После глубин 600 м (на удалении 30 км от бочки) начинался континентальный склон с углами наклона 6° - 15°. Дно района образовано грубозернистыми песчаными осадками с примесью алевритоглинистых илов плотностью $\rho = 1.6$ г/см^3, пористостью 60 - 70%. Рельеф дна довольно изрезан (особенно в сторону открытого моря), что конечно может сильно ограничивать общность выводов.

Погода во время проведения работ была следующей: сила ветра изменялась от 5 - 7 баллов до 0. Соответственно этому ветровое волнение поверхности моря в районе работ изменялось от 3 - 5 баллов до 0, при сохранении зыби 2 балла; направление волнения преимущественно северо-западное.

Гидрология была типична для данного района в летнеосенний период. Скорость звука у поверхности имела величину 1482 м/с и очень медленно падала с глубиной. Между горизонтами 15 и 35 м располагался резкий слой скачка скорости звука, где скорость понижалась с 1480 м/с (на горизонте 15 м) до 1457 м/с (на горизонте 35 м). Дальнейшее падение скорости звука с глубиной происходило медленнее, минимум скорости приходился на глубину 65 - 70 м, где она составляла 1452.5 м/с. Ниже этого горизонта и до самого дна скорость линейно возрастала и достигала у дна значения 1455.5 м/с. Соответствующий график зависимости изменения скорости звука c от глубины z представлен на рис. 2.

Экспериментальная методика практически совпадала с вышеописанной; использовалась та же антенна со средней частотой 5 кГц. В качестве зондирующей посылки применялись импульсы линейно частотно-модулированного (ЛЧМ) сигнала длительностью $\tau = 1$ с и девиацией частоты $\Delta f = 120$ Гц при $f_{ср} = 5$ кГц. Антенна располагалась последовательно на глубинах 30; 60; 100; 150; 180 и 200 м; значения азимутальных углов были 298° (к береговой черте) и 118° (в сторону моря). В каждом положении антенны производилось излучение 10 посылок.

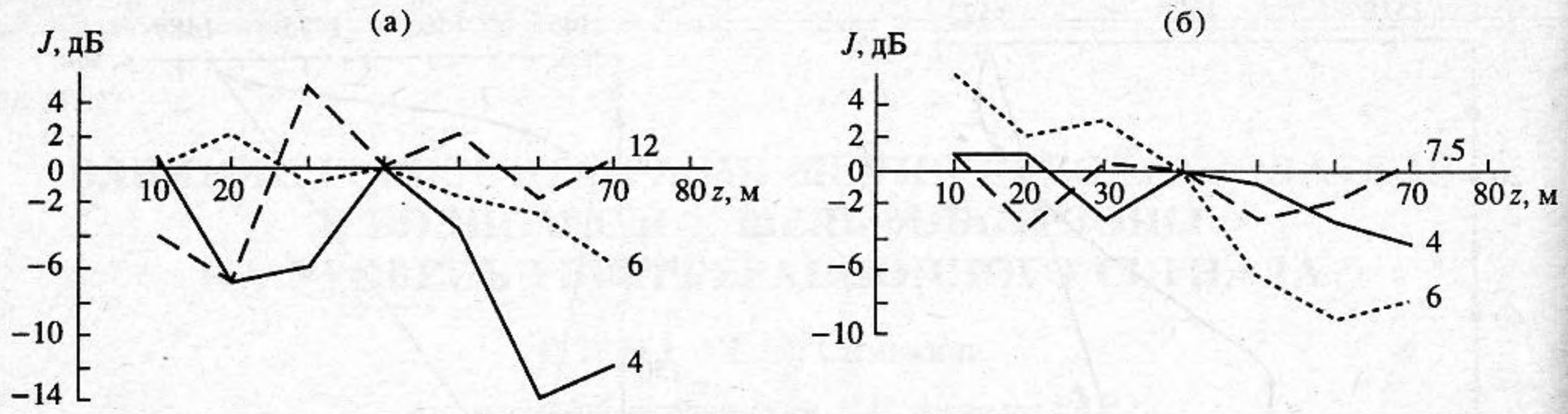

Рис. 3. Зависимость уровня J реверберации от горизонта размещения преобразователя в Средиземном море. Излучение: а – в направлении берега, б – в направлении открытого моря. Параметром кривых служит время после начала излучения в секундах.

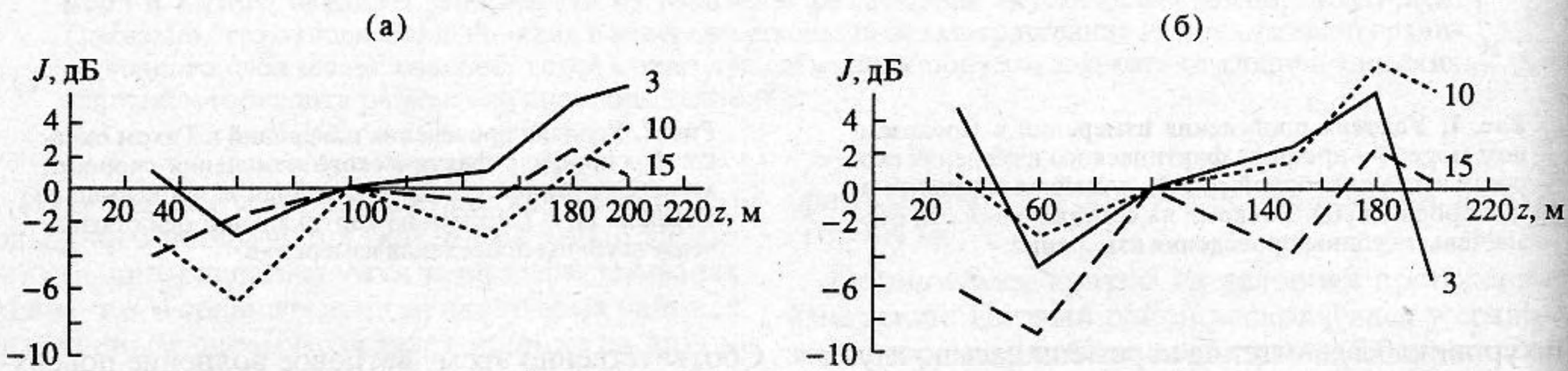

Рис. 4. Зависимость уровня J реверберации от горизонта размещения преобразователя во втором районе: а – при излучении в направлении берега, б – при излучении в направлении открытого моря. Параметром кривых служит время после начала излучения в секундах.

Перейдем теперь к интерпретации полученных результатов. На рис. 3 и 4 представлены зависимости уровня реверберации J от глубины преобразователя при различных задержках относительно начала излучения для каждого из районов. Уровни сигналов даны в децибелах относительно уровня реверберации при расположении антенны в середине водного слоя: $z = 40$ м в первом районе и $z = 100$ м во втором районе. Для удобства восприятия экспериментальные точки соединены отрезками прямых. Хотя объем экспериментальных данных включает в себя информацию для всего интервала задержек, ограниченного отношением сигнал/шум большим 2, мы приводим лишь некоторые графики, призванные проиллюстрировать основные закономерности поведения реверберационного отклика.

Обратимся к графикам рис. 3, относящимся к первому району. При излучении зондирующей посылки как по направлению к берегу (рис. 3а), так и в направлении открытого моря (рис. 3б) на начальных участках реверберационных сигналов (4 с и 6 с) обнаруживается устойчивая тенденция снижения уровня реверберации при приближении преобразователя ко дну и его рост при подъеме к поверхности. После 12 с (береговой азимут) и 7.5 с (морской азимут), зависимость уровня сигнала от горизонта излучения-приема практически отсутствует. Разброс значений J при излучении в направлении открытого моря заметно меньше, чем при излучении в сторону берега.

Рассмотрим теперь данные для второго района (рис. 4). Прежде всего отметим достаточно определенную тенденцию увеличения уровня реверберации при приближении преобразователя ко дну и снижения уровня сигналов при подъеме его от дна до глубины приблизительно 60 м. При дальнейшем уменьшении глубины наблюдается рост J. Характер изменения уровня реверберации с глубиной антенны значительно отличается от наблюдавшегося в первом районе. Такое поведение реверберационных сигналов достаточно хорошо выражено как для "берегового", так и для "морского" азимутов. Однако для сигналов на начальных участках (3 с) при излучении в сторону моря зависимость экспериментальных точек от глубины размещения преобразователя выражена гораздо слабее и маскируется их значительным разбросом.

Таким образом, картина поведения реверберации в двух районах Мирового океана существенно различна. Уже отмечалось, что подробный расчет характеристик реверберации в шельфовых зонах океана затруднен, поскольку нам практически никогда не известна исчерпывающая информация о характеристиках района. Кроме того, тонкая структура рассеянных сигналов является сугубо локальной характеристикой. По этим причинам мы пошли путем приближенных оценок, что позволило нам проанализировать роль границ водного слоя. Так как скорость звука у дна в обоих районах меньше, чем у поверхности, можно ожидать, что основной вклад в рассеянное поле обусловлен дном. Зададимся вопросом, дает ли вклад в реверберационный сигнал шероховатая морская поверхность.

Для выявления основных тенденций изменения уровня реверберации с глубиной преобразователя необходимо учесть гидрологические условия измерений, причем достаточно (как мы убедимся в дальнейшем) использовать грубо изоградиентную (по скорости звука) модель водной среды. С этой целью мы использовали линейную аппроксимацию $c(z)$ (см. рис. 1 и 2) между значениями скорости звука у поверхности и дна. Из графиков рис. 1 и 2 легко получить значения градиентов скорости звука $a = 0.023$ км$^{-1}$ и $a = 0.083$ км$^{-1}$ для первого и второго районов, соответственно.

Для того, чтобы луч, пройдя водный слой толщиной z с градиентом a, коснулся поверхности, он должен выйти из источника под углом α_k, определяемым выражением [1]

$$\operatorname{tg}\alpha_k = \sqrt{2az}.$$

Лучи, имеющие углы выхода из источника меньше α_k, не достигнут поверхности. Лучи с углами выхода больше α_k достигнут поверхности, рассеются на ней и отразятся от нее. По мере приближения к поверхности число лучей первой группы уменьшается, а второй – увеличивается, в связи с чем роль морской поверхности в формировании реверберационного отклика должна возрастать.

При расположении преобразователя вблизи дна ($z = H$) $\alpha_k = 3.47°$ и $\alpha_k = 10.33°$ для первого и второго районов, где H равно 85 м и 220 м, соответственно. Ясно, что в первом районе даже при размещении преобразователя у дна поверхность может внести заметный вклад в реверберационный отклик, поскольку большая часть лучей, выходящих вверх из источника, достигает поверхности (углы выхода от 3.47° до 6°, напомним, что полуширина диаграммы направленности преобразователя составляет 6°). Для описанного выше состояния морской поверхности параметр Рэлея P лежит в пределах 0.7 - 0.3 (в зависимости от угла скольжения), поэтому наряду с отраженным от поверхности сигналом существует сигнал, рассеянный назад. Он может наблюдаться при относительно малых временах задержки. Сигналы, распространяющиеся по отраженным от поверхности лучам, в дальнейшем падают на дно и, рассеиваясь на нем, дают вклад в реверберационный отклик при больших временах задержки. Возрастание уровня реверберационного сигнала при приближении к морской поверхности хорошо видно на начальных участках экспериментальных записей рис. 3. С ростом времени задержки вклад граничного (донного и поверхностного) рассеяния уменьшается, так как более крутые лучи затухают, а участие пологих лучей в создании рассеянного поля невелико. Это приводит к усилению относительной доли объемного рассеяния, по-видимому, слабо зависящего от глубины в условиях прибрежного клина. Эффектом объемного рассеяния видимо можно объяснить слабую зависимость J от глубины точки излучения-приема при больших задержках времени (кривые 12 с и 7.5 с на рис. 3). Влияние границ сохраняется более длительное время при излучении в направлении берега, так как по мере вхождения лучей в клин они становятся все круче, что ведет к росту интенсивности рассеянного сигнала.

Во втором районе, при размещении преобразователя у дна поверхность не дает вклада в рассеянное поле (без учета боковых лепестков). Легко убедиться, что при любой глубине преобразователя в пределах 220 - 65 м лучи к поверхности не выходят и поэтому при удалении от дна до глубины 65 м уровень реверберации должен падать, а при дальнейшем уменьшении глубины падение должно замедлиться и затем смениться ростом. Если для горизонтов в этом диапазоне провести более детальный расчет с использованием значения градиента скорости звука в слое скачка, то окажется, что влияние поверхности должно проявляться наиболее заметно, начиная с глубины 20 м, т.е. при нахождении преобразователя в самом слое скачка.

Экспериментальные данные рис. 4 следуют именно такой закономерности. Конечно, хотелось бы при измерениях использовать более мелкий шаг по вертикали, особенно в диапазоне глубин от оси звукового канала до поверхности, однако и имеющиеся данные вполне удовлетворительно выявляют поведение реверберационного сигнала.

Итак, сформулируем общий вывод. В общем случае обе границы, дно и поверхность, могут давать вклад в реверберационный сигнал. Относительный вклад в формирование реверберационного сигнала той или иной границы водного слоя мелководных районов океана в значительной мере зависит от гидрологических условий и горизонта размещения преобразователя. С целью минимизации уровня реверберационной

помехи горизонт размещения преобразователя должен соответствовать глубине, при которой преобразователь удален от границы, дающей основной вклад в рассеяние, на такое расстояние, когда влияние другой границы водного слоя только начинает проявляться. В первом районе этот горизонт расположен на небольшом расстоянии от дна, а во втором районе – вблизи нижней границы слоя скачка.

Работа выполнена при поддержке Российского фонда фундаментальных исследований (код проекта 94-02-04149).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Бреховских Л.М.* Волны в слоистых средах. М.: Изд. АН СССР, 1957. С. 502.

The Effect of the Transducer Depth Level on the Reverberation Intensity in Shelf Regions

E. V. Simakina

The level of reverberation signals in Mediterranean and Pacific shelf regions is studied as a function of the acoustic transducer depth level. It is demonstrated that the relative contribution to the reverberation scattering response at the boundary of a shelf water layer can appreciably depend upon the hydrological conditions and the transducer depth.