

УДК 551.463;534.88

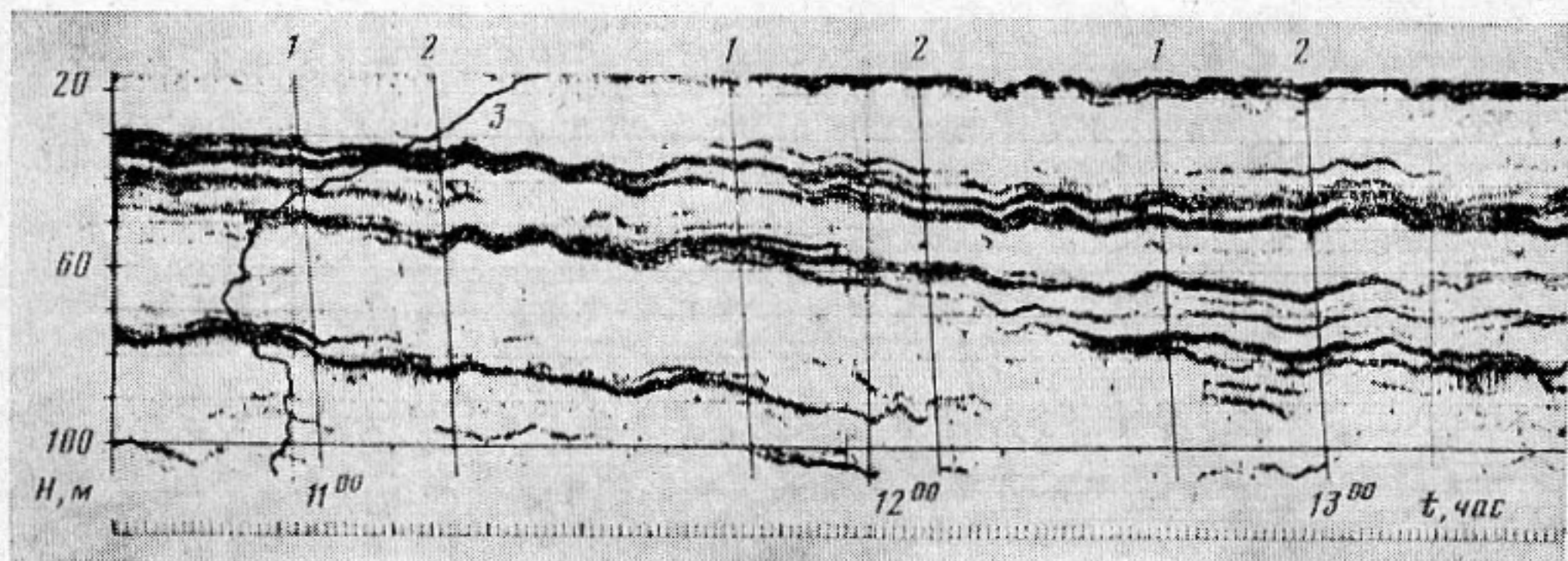
РАССЕЯНИЕ ЗВУКА НА ТОНКОЙ СТРУКТУРЕ
ГИДРОФИЗИЧЕСКИХ ПОЛЕЙ В ОКЕАНЕ

Саломатин А. С., Шевцов В. П., Юсупов В. И.

На основе синхронных измерений обратного рассеяния звука и гидрофизических параметров показано, что наблюдаемые в океане тонкие звукорассеивающие слои (ЗРС) обусловлены рассеянием на границах резкого изменения скорости звука. Важную роль в формировании таких слоев играют процессы двойной диффузии.

Звукорассеивающие слоистые структуры наблюдаются в океане повсеместно и имеют различную природу. Хорошо известны, например, неоднородности в виде звукорассеивающих слоев, образованных скоплением биологических объектов. Не меньшее распространение однако имеют неоднородности и другого типа. Среди них особое место занимают тонкослоистые ЗРС, которые чаще всего приурочены к районам с развитой тонкой структурой гидрофизических полей типа фронтальных зон, районов со сложной динамикой вод, интенсивными внутренними волнами и др. [1]. Специфические особенности их пространственно-временной изменчивости и характер связи с микромасштабными процессами указывают на то, что они не связаны с биологическими факторами, а имеют иную природу. Данная работа посвящена экспериментальному изучению таких ЗРС.

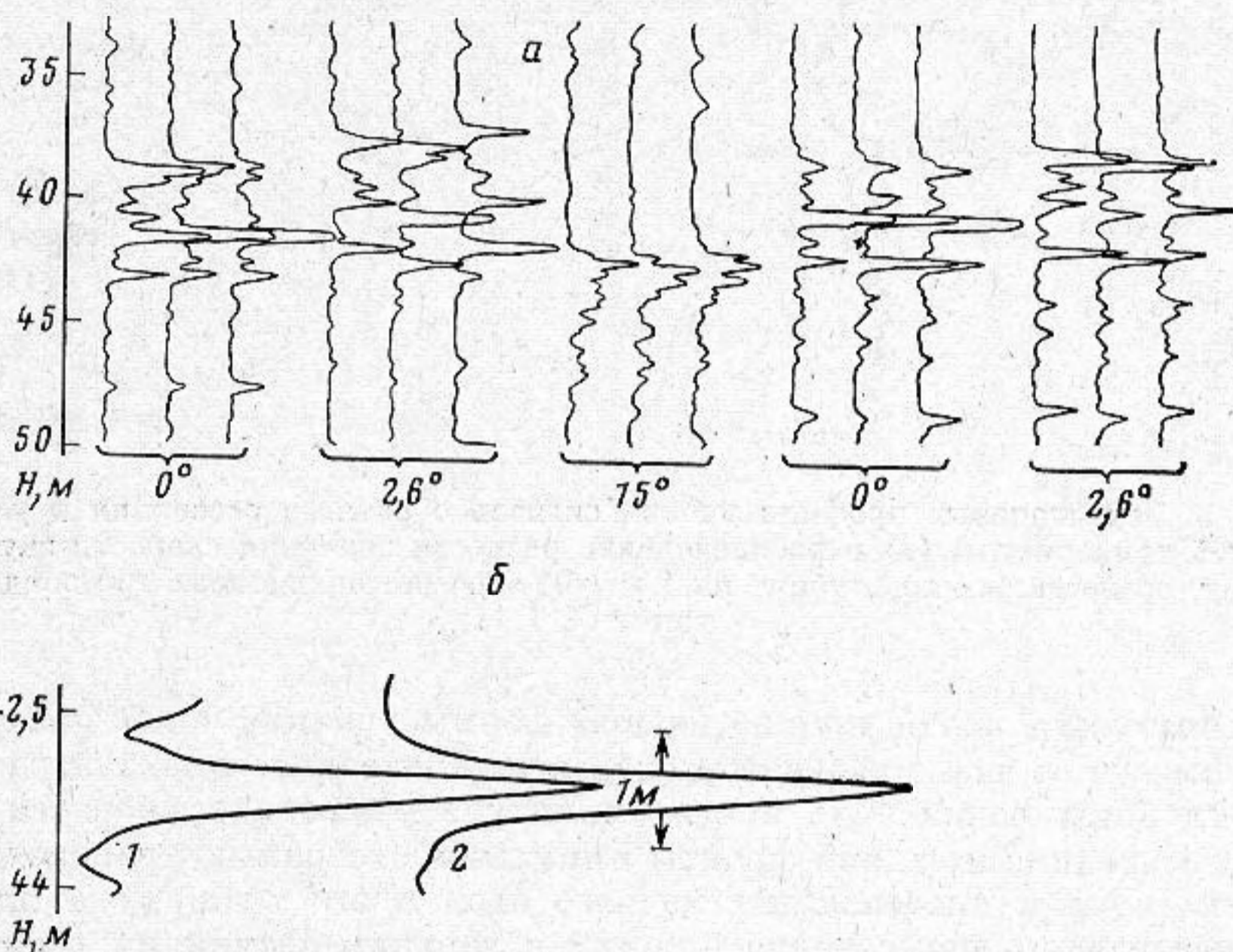
Выполнялись синхронные измерения обратного рассеяния при узконаправленном излучении звука частотой 12 и 30 кГц, а также температуры, электропроводности (солёности), скорости звука и ее локального градиента. В отдельных случаях указанные измерения дополнялись биологическими обловами. Акустические наблюдения проводились методом дистанционного зондирования тонально-импульсными сигналами в вертикальном направлении либо под наклонными углами в диапазоне $\pm 20^\circ$ относительно вертикали. Принятые сигналы обратного рассеяния после усиления, компенсации сферического расхождения и детектирования регистрировались на эхолентах. Кроме того, они подавались на вычислительный комплекс ИВК-2, где проходили обработку в реальном масштабе времени и в цифровой форме заносились во внешнюю память ЭВМ. Результаты обработки выводились на цифropечать и графopостроитель. Гидрофизические параметры среды измерялись в режиме непрерывного зондирования по глубине



Фиг. 1. Эхолотационная запись акустических сигналов обратного рассеяния частоты 30 кГц, 1 — зондирования № 1—3 температуры и солёности, 2 — зондирования № 1—3 скорости звука, 3 — профиль скорости звука, измеренный при зондировании № 1

с помощью термосолезонда «Исток-4» и прибора, включающего в себя два циклических скоростемера, датчики которых разнесены по вертикали на 1 м [2].

Характерная запись наблюдающихся акустических неоднородностей приведена на фиг. 1. Обращает на себя внимание крайне неравномерное распределение звукорассеивающих свойств по глубине. Выделяются довольно устойчивые тонкие слои большой протяженности, в которых интенсивность рассеяния на 2—3 порядка выше по сравнению с прилегающими областями. Вертикальные размеры этих слоев совпадают с предельным разрешением по глубине, обусловленным длительностью посылки. На фиг. 2 приведены профили уровня сигнала обратного рассеяния от

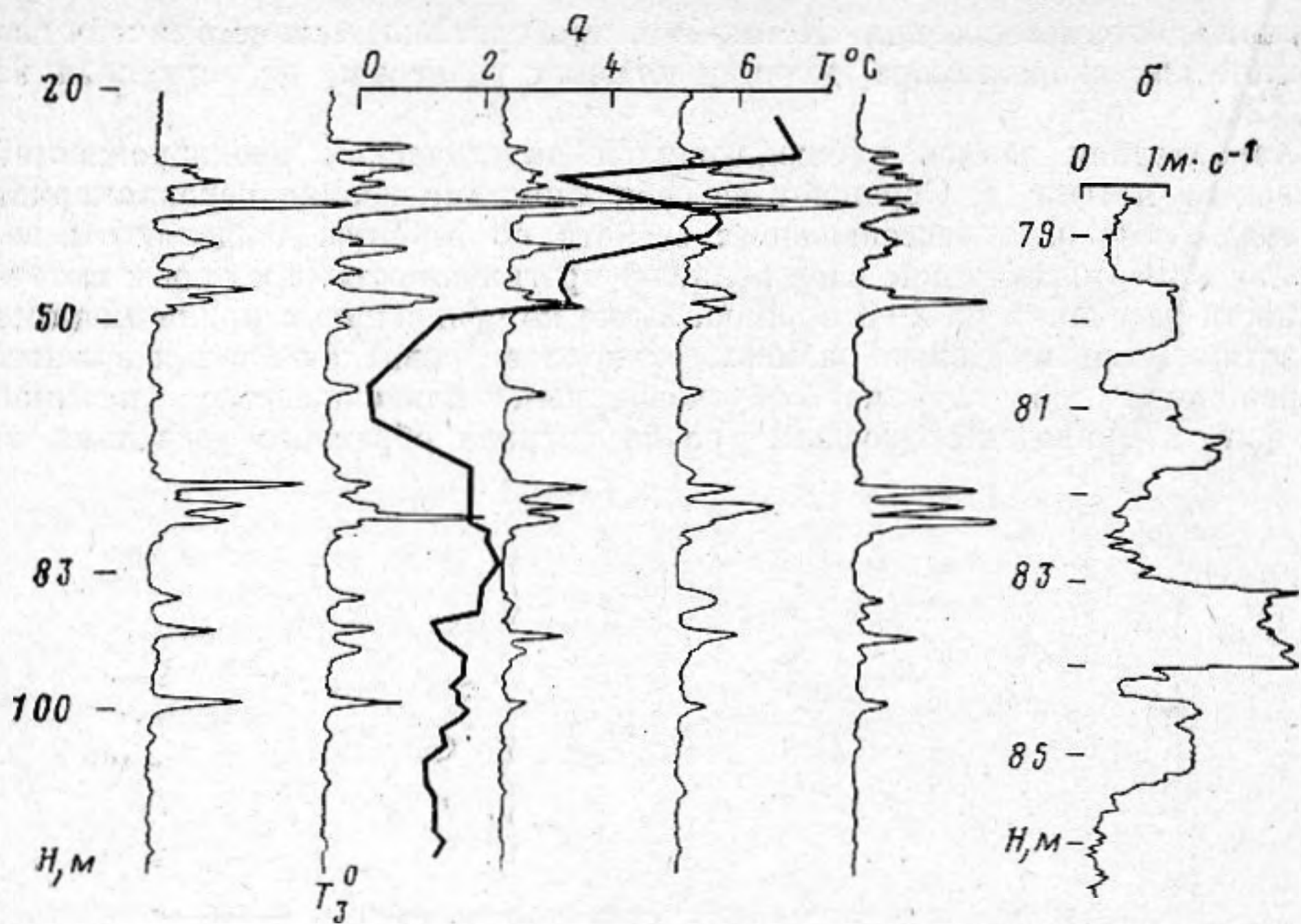


Фиг. 2. Профили уровня сигнала обратного рассеяния, полученные при зондировании импульсами длительностью 0,3 мс под разными углами относительно вертикали (а) и фрагмент профиля в сравнении с сигналом, принятым от калибровочного шарика (б). 1 — сигнал от слоя, 2 — сигнал от шарика

ЗРС и калибровочного шарика диаметром 4 см при длительности посылки 0,3 мс. Видно, что сигналы, рассеянные слоем и калибровочным шариком, между собой практически не отличаются. А это означает, что фактическая толщина ЗРС меньше 0,25 м.

В первоначальных предположениях не исключалось, что даже такие слои могут быть образованы биологическими скоплениями. Для проверки были проведены обловы методом горизонтального траления. Результаты оказались отрицательными. Поэтому в дальнейшем основное внимание уделялось изучению связи наблюдаемых ЗРС с гидрофизическими процессами. В наиболее общем виде такая связь проявляется в том, что обособленные группы ЗРС совпадают с границами инверсий и областями, где усредненный градиент гидрофизических параметров имеет повышенные значения (фиг. 3, а). Детальные исследования показывают, что эти области представляют собой серию квазиоднородных слоев, разделенных тонкими прослойками с обостренным градиентом. Именно к таким прослойкам и приурочены наблюдаемые ЗРС (фиг. 4).

Вертикальную структуру прослоек исследовали с помощью вышеупомянутого акустического зонда, измерительные базы которого при толщине луча меньше 1 см имели длину 20 см и в процессе зондирования были ориентированы в горизонтальной плоскости. При этом каждая граница, разделяющая однородные слои с разными значениями скорости, в выходном сигнале канала разности показаний скоростемеров отображается

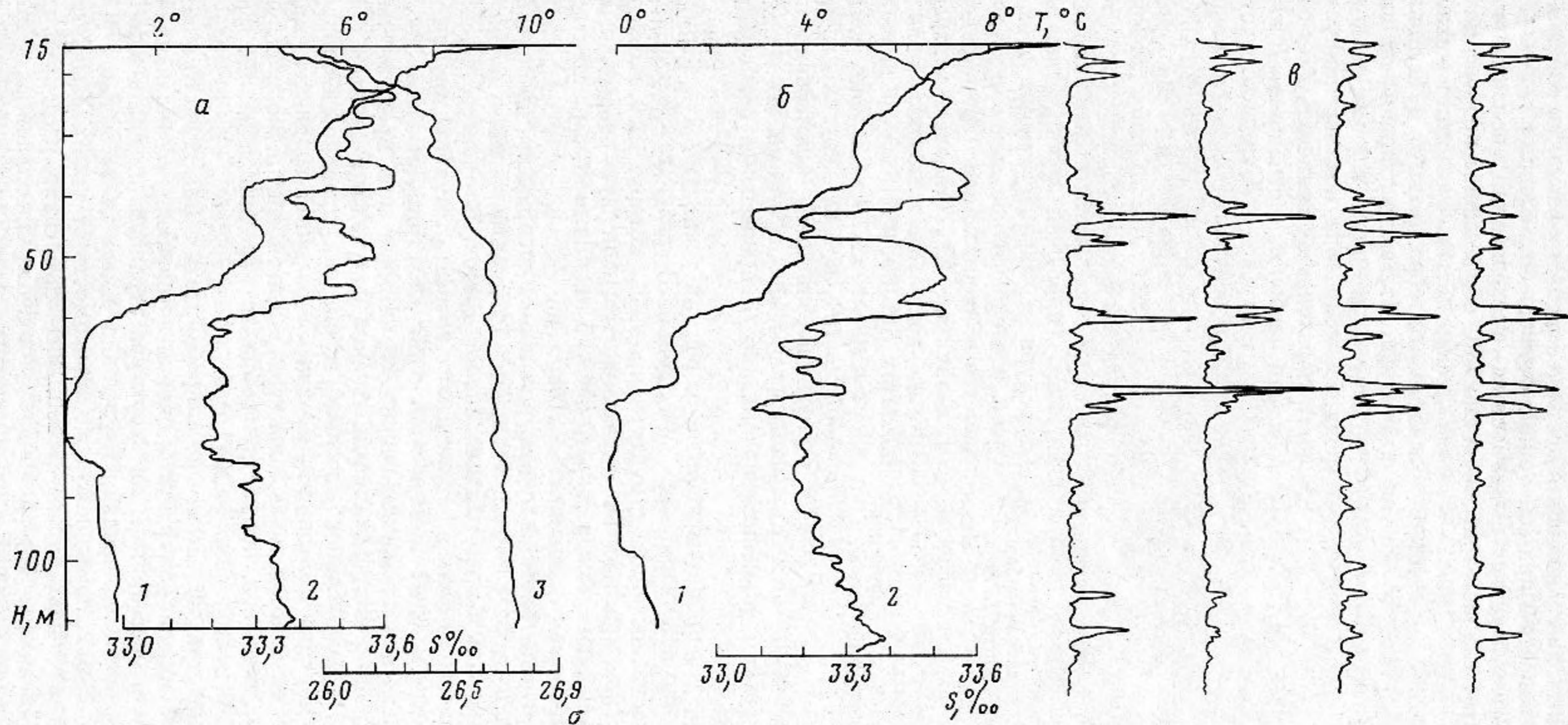


Фиг. 3. Вертикальные профили уровня сигнала обратного рассеяния и усредненной температуры (а) и распределение разности значений скорости звука в точках, разнесенных по глубине на 1 м (б), зарегистрированные при зондировании № 1

в виде импульса почти прямоугольной формы той или иной полярности в зависимости от знака градиента скорости. Длительность импульса в масштабе глубины равна 1 м, а его амплитуда — перепаду скорости звука в слоях. Передний и задний фронты импульсов отображают распределение скорости звука в пределах переходного слоя и его толщину в моменты последовательного пересечения нижним и верхним датчиками (фиг. 3, б).

Полученные данные свидетельствуют, что прослойки между соседними однородными слоями, совпадающие по глубине с ЗРС, имеют толщину несколько см, а перепады скорости звука в них — порядка $1 \text{ м} \cdot \text{с}^{-1}$. Локальные значения градиента скорости при этом составляют десятки с^{-1} . Для аппроксимации скорости в пределах прослоек были опробованы модель переходного слоя Эпштейна и модель в виде однородных полупространств, разделенных тонким слоем с постоянным градиентом скорости. Более близкой к реальным распределениям оказалась вторая модель, в то время как слой Эпштейна неприемлем именно из-за того, что с его помощью невозможно отобразить линейные участки, характерные для измеренных профилей.

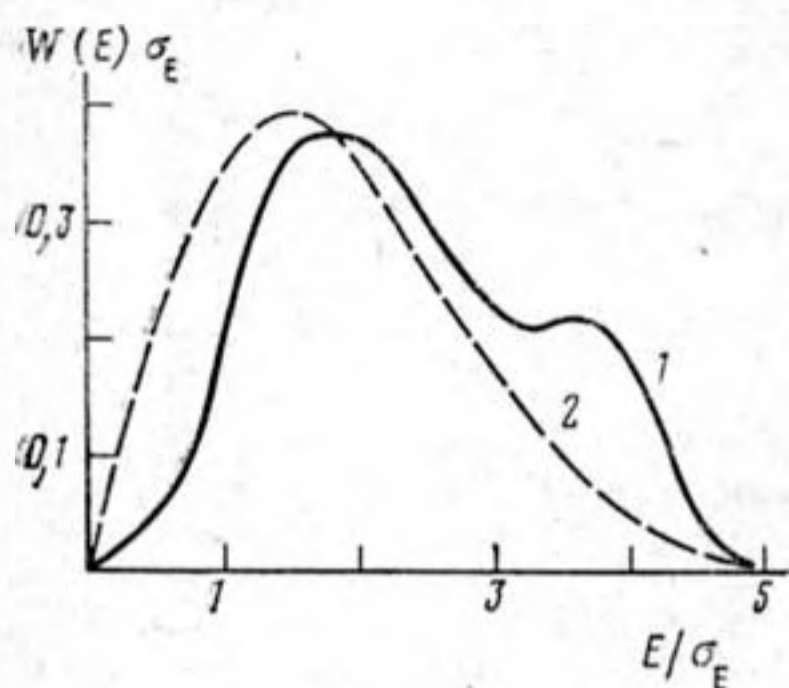
На основе линейной модели по известным формулам [3] рассчитывались амплитудные коэффициенты отражения от конкретных переходных слоев и сравнивались с измеренными его значениями. Результаты сопоставления показывают, что наблюдаемые ЗРС полностью соответствуют пикам на расчетных профилях. Однако в среднем оценки коэффициента отражения превосходят измеренные его значения примерно на порядок. Так, например, по результатам зондирования № 1 скорости звука (фиг. 1) теоретические значения коэффициента отражения звука частоты 30 кГц от прослоек на горизонтах 34, 57 и 83 м составляют: $1,2 \cdot 10^{-4}$; $3,7 \cdot 10^{-5}$ и $1,5 \cdot 10^{-4}$. Измеренная же его величина в соответствующих ЗРС равна $1,7 \cdot 10^{-5}$; $1,2 \cdot 10^{-5}$ и $2,2 \cdot 10^{-5}$. Указанное соотношение не зависит от выбора вида аппроксимирующей функции. Оно подтверждается также и результатами численных расчетов, когда реальное распределение скорости вводилось в ЭВМ в виде аналогового электрического сигнала с выхода зонда и задавалось набором элементарных слоев, толщины которых намного меньше длины волны излучения. Полученные таким образом теоретиче-



Фиг. 4. Вертикальные распределения температуры ($T^\circ C$), солености ($S\text{‰}$) и относительной плотности (σ), полученные при зондировании № 2 (а) и зондировании № 3 (б) в сравнении с профилями уровня сигнала обратного рассеяния (θ), зарегистрированными синхронно с зондированием № 3

ские профили коэффициента отражения в качественном отношении находятся в хорошем соответствии с экспериментальными данными, но, как отмечалось выше, между ними имеют место некоторые количественные расхождения. Ниже вернемся к обсуждению этого факта, но сначала остановимся на вопросе о природе тонких отражающих слоев.

Анализ результатов выполненных исследований показывает, что в большинстве случаев тонкослоистые ЗРС обусловлены процессами двой-



Фиг. 5. Распределение нормированной на стандартное отклонение σ_E амплитуды сигналов E , принятых от звукорассеивающего слоя вблизи горизонта 80 м за время с 11 до 11 час 45 мин. (фиг. 1). Длительность зондирующего импульса — 1 мс, период следования посылок — 2 с. 1 — экспериментальная функция, 2 — распределение Релея

ной диффузии. За счет этого механизма, в частности, образованы и ЗРС, приведенные на фиг. 1. Действительно, все они приурочены к границам, где превалирующая роль в обеспечении плотностной устойчивости переходит от температуры к солёности, или наоборот, а отношение R вкладов этих параметров — в изменение плотности меньше критического значения, равного 2 (фиг. 4). При таких условиях неизбежно развитие неустойчивости типа «солевых пальцев» либо «послойной конвекции», в результате чего формируются тонкие прослойки с повышенным значением градиента гидрофизических параметров. Структура и характеристики этих прослоек, а следовательно, и их акустические свойства в значительной мере определяются величиной R . Наиболее контрастные ЗРС наблюдаются, например, вблизи горизонтов 40, 60 и 70 м, где значения R лежат в пределах 1,1–1,6 (фиг. 4, в). Неоднородности же на других границах с большей величиной R выражены не так

ярко и отраженные от них сигналы имеют меньшую амплитуду. Объясняется это резким усилением интенсивности процессов в области значений $R < 2$ [4].

Известно, что процессы двойной диффузии реализуются в форме конвективных ячеек и волновых возмущений. В результате формируется сложная пространственная структура прослоек, которую невозможно отобразить плоской моделью. По-видимому, этим в первую очередь и объясняются расхождения между теоретическими оценками коэффициента отражения и экспериментальными его значениями.

Неадекватность плоской модели реальному распределению непосредственно видна и из результатов измерений градиента скорости звука с помощью разносенных по вертикали скоростемеров. В процессе зондирования они пересекают один и тот же слой в точках, отстоящих друг от друга по горизонтали на 1–2 м. При этом слой регистрируется дважды через интервал времени в несколько секунд, за который зонд проходит по глубине расстояние между датчиками. Анализ полученных записей показывает, что в горизонтальной плоскости слой, как правило, неоднороден. В масштабе порядка 1 м толщина прослоек и величина градиента скорости звука в них отличается в несколько раз. Заметное отличие в структуре слоев можно видеть, в частности, сравнивая передние и задние фронты импульсов, представленных на фиг. 3, б.

Плоскослоистую модель можно апробировать также и чисто акустическими способами, например путем оценки когерентной составляющей сигнала обратного рассеяния. Если структура отражающих слоев в горизонтальной плоскости однородна, то должна иметь место сильная угловая зависимость. В действительности же зависимость от угла оказывается более сложной и в общем случае слабой. Энергия сигнала, рассеянного в обратном направлении обособленной группой неразделяющихся ЗРС при зондировании под разными углами в диапазоне $\pm 20^\circ$, изменяется незначительно, что свидетельствует о малом вкладе зеркальной компоненты. К та-

кому же выводу приводит и анализ распределения плотности вероятности амплитуды импульсных сигналов, рассеянных тонкими одиночными ЗРС (фиг. 5).

Тем не менее в структуре сигнала при вертикальном и наклонном зондированиях наблюдается существенное отличие (фиг. 2, а), характер которого свидетельствует, во-первых, об анизотропии неоднородностей по горизонтали, а во-вторых, — о «неравноправии» разных слоев в серии, относящейся к одной границе раздела разнородных вод. Нижние ЗРС, которые обусловлены вторичными прослойками, сформированными при каскадном переносе энергии процессами двойной диффузии, обладают большей чувствительностью к углу зондирования. Угловая зависимость рассеяния здесь выражена сильнее. В некоторых случаях она бывает такой же резкой, как и при зеркальном отражении.



Фиг. 6. Эхолокационная запись акустических неоднородностей, характерных для нестационарного режима процессов двойной диффузии

Очевидно, что известные модели статистически однородной среды [5—7] для описания тонкослоистых ЗРС малоприспособны. Модель обсуждаемых ЗРС, не противоречащую всей совокупности имеющихся данных, можно представить в виде тонких высокоградиентных прослоек, разделяющих более мощные однородные слои. Ее параметрами являются: перепад скорости звука, постоянный для данной прослойки; ее толщина, зависящая случайным образом от горизонтальных координат; вид и параметры аппроксимирующей функции.

Так как отражающая способность слоя очень сильно зависит от его относительной толщины и дифференциальной структуры поля скорости звука [3], то реальный вклад в сигнал вносит не вся освещенная площадь, а лишь отдельные пятна, где выполняются необходимые соотношения. В каждом слое эти пятна, по-видимому, имеют свои характерные масштабы и определенный вид распределения в горизонтальной плоскости. Принятый сигнал в таком случае является суммой сигналов конечного числа источников, имеющих ту или иную диаграмму направленности: узкую, если горизонтальные размеры пятна много больше длины волны излучения, и широкую, если они сравнимы. С позиций рассмотренной схемы легко объясняются, на первый взгляд, противоречивые экспериментальные данные по энергетике и угловой зависимости рассеяния. Она хорошо вписывается в существующие представления о процессах формирования микроструктуры океана и указывает путь, как дистанционные акустические наблюдения можно использовать для гидрофизических исследований.

До сих пор было акцентировано внимание лишь на устойчивых ЗРС, обусловленных процессами двойной диффузии, протекающими в стационарном режиме. Однако возможен и другой режим, когда первоначальные возмущения нарастают во времени. При их разрушении порождается турбулентность, размываются границы слоев, происходит необратимая перестройка структуры, возбуждаются внутренние волны. Такие случаи в океане хотя и редки, но наблюдаются. На фиг. 6 показан один из них, когда перечисленные процессы были ярко выражены и отчетливо видны на записи. Заметный вклад в рассеяние здесь вносят турбулентные пульсации скоро-

сти звука. Поэтому модель тонкослойных ЗРС для описания неоднородностей недостаточна. Ее необходимо дополнить известными моделями, о которых упоминалось выше.

В заключение отметим, что не только процессы двойной диффузии ответственны за образование тонкослойных ЗРС в океане. Другие механизмы формирования микромасштабной структуры гидрофизических полей также порождают акустические неоднородности, доступные наблюдению методом дистанционного зондирования. Однако приведенные ЗРС в каждом случае имеют свои особенности и требуют отдельного рассмотрения.

Авторы выражают благодарность Варлатому Е. П. и Ростову И. Д. за помощь, оказанную при выполнении данной работы.

ЛИТЕРАТУРА

1. Шевцов В. П. Исследование тонкой структуры гидрофизических полей дистанционным акустическим методом.— В кн.: Расширенные тез. докл. Всесоюз. симп. «Тонкая структура и синоптическая изменчивость морей». Таллин: Изд-во АН ЭССР, 1980, с. 185—189.
2. Шевцов В. П., Варлатый Е. П. О методике измерения тонкой структуры поля скорости звука в океане.— Океанология, 1976, т. XVI, № 2, с. 351—357.
3. Бреховский Л. М. Волны в слоистых средах. М.: Наука, 1973.
4. Тернер Дж. Эффекты плавучести в жидкостях. М.: Мир, 1977.
5. Татарский В. И. Распространение волн в турбулентной атмосфере. М.: Наука, 1967.
6. Proni V. R., Apel V. R. On the use high-frequency acoustics for study of internal waves and microstructure.— J. Geophys. Res., 1975, v. 80, № 9, p. 1147—1151.
7. Корнеев В. Г., Ломейко А. Н., Любицкий А. А., Розенберг А. А. Объемное рассеяние звука на частоте 25 кГц при наличии слоя скачка температуры.— Акуст. журн., 1979, т. 25, № 4, с. 556—560.

Тихоокеанский океанологический
институт ДВНЦ АН СССР

Поступила в редакцию
4.VI.1984