

УДК 534

**ОБ ИССЛЕДОВАНИИ ТОНКОЙ СТРУКТУРЫ  
ЗВУКОРАССЕИВАЮЩИХ СЛОЕВ ОКЕАНА***Борисов А. С., Карнов В. С., Кудин А. М.,  
Топорнин К. В.*

Акустические исследования, выполненные с помощью многолучевого эхолота, позволили выделить элементы тонкой структуры звукорассеивающих слоев океана. Сопоставление данных акустического зондирования с данными гидрофизического зондирования свидетельствует о связи тонкой структуры звукорассеивающих слоев с тонкой структурой гидрофизических полей океана.

Модель микроструктуры вод океана, основанная на формировании каскада пятен перемешанной жидкости в стратифицированной среде [1], делает обоснованную попытку их выделения с помощью многолучевого эхолота.

Натурный эксперимент был выполнен на научно-исследовательском судне «Академик Борис Петров» в восточной части Атлантического океана. Ему предшествовал цикл лабораторных исследований, посвященный изучению эволюции пятен перемешанной жидкости в стратифицированной по плотности среде [2, 3]. В этих исследованиях с помощью голографической интерферометрии было показано, что на верхней и нижней границах таких пятен формируются тонкие слои с практически одинаковыми по величине градиентами плотности в них. Значения градиентов плотности в этих слоях во много раз (иногда более чем на порядок) превышают фоновые. Это обстоятельство существенно при анализе известных оценок амплитуд эхосигналов от неоднородностей плотности [4–9] при ультразвуковом зондировании, поскольку такие оценки обычно делаются в рамках теории возмущений и справедливы лишь для малых значений градиента плотности.

В работе [2] показано, что при лабораторных исследованиях время жизни пятен перемешанной жидкости в стратифицированной среде измеряется часами. Согласно [10], продолжительность существования высокоградиентных слоев в океане  $\sim 10$  ч. Столь продолжительного времени вполне достаточно для увеличения заселенности пятен морскими животными при суточной миграции звукорассеивающих слоев (ЗРС) [8, 9]. Важно, что высокоградиентные слои на границах пятна играют определяющую роль в увеличении акустического контраста пятна при его ультразвуковом зондировании. На этих слоях, как на жидком грунте, может происходить концентрирование золя, отмирающего фитопланктона и др., служащих пищей для морских животных [9]. Поэтому концентрация звукорассеивающего материала в пятнах будет выше, чем в окружающей среде.

Важным следствием работ [2, 3] является обнаружение сложной архитектуры пятна, сформировавшегося в результате взаимодействия перемешанных областей различного объема. Пятно представляет собой протяженное, горизонтально ориентированное плотностное образование с изменяющимися характерными вертикальными размерами отдельных его частей. Последующие лабораторные исследования выяснили механизм взаимодействия пятен на разных «этажах» и их объединения.

Таким образом, упомянутый цикл лабораторных исследований свидетельствовал о возможности регистрации элементов тонкой структуры гидрофизических полей (ГФП) акустическими методами и предсказывал

их сложную архитектуру. Кроме того, результаты выполненных работ позволяли осуществить целенаправленный поиск технических средств, способных отображать тонкую структуру ГФП.

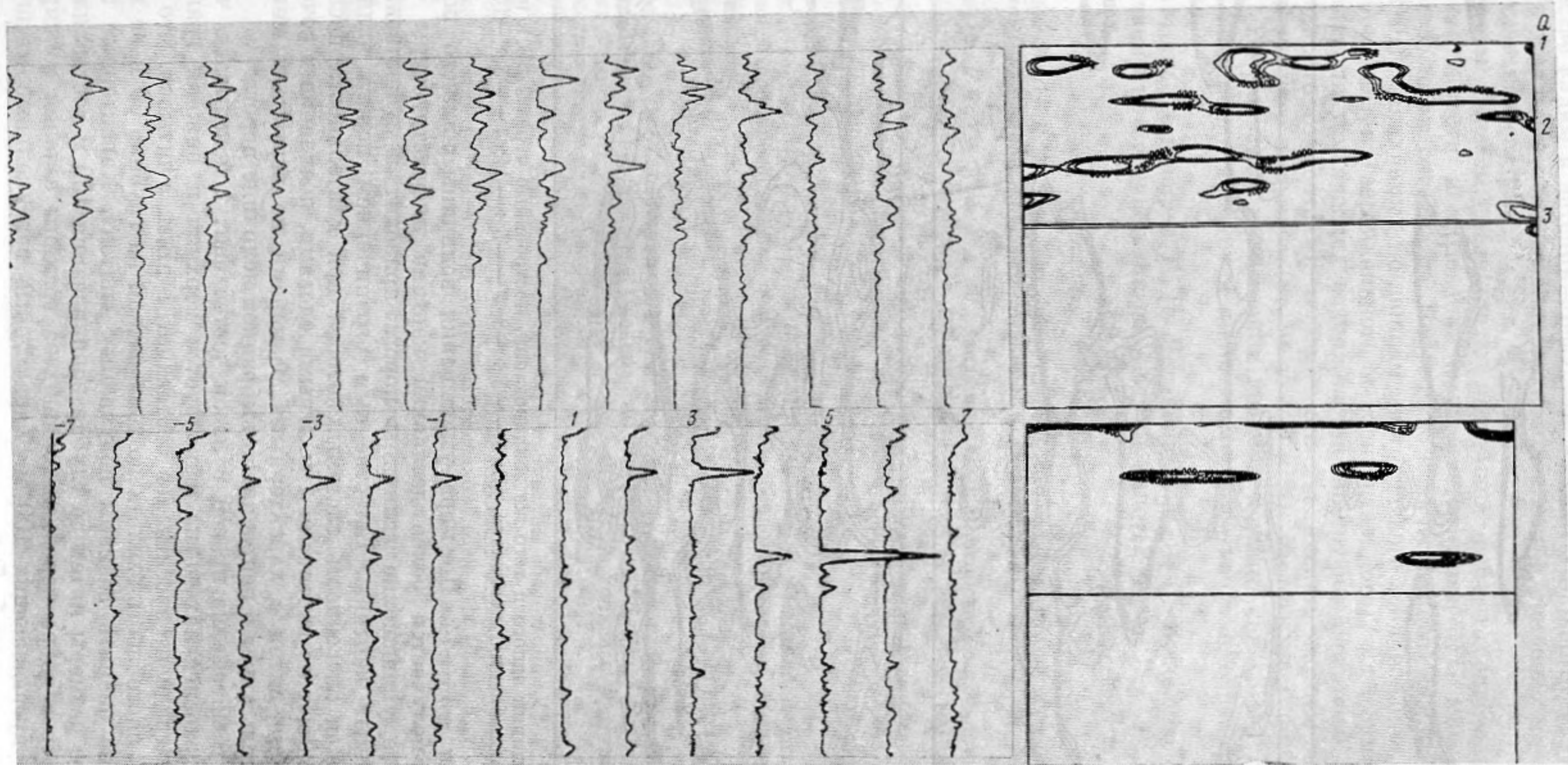
Основным средством, используемым при исследованиях структуры ЗРС в районах с развитой тонкой структурой ГФП, до сих пор был однолучевой высокоразрешающий гидролокатор. В отличие от однолучевых многолучевые акустические системы позволяют перейти на новый уровень изучения структуры ЗРС океана. В самом деле, единичное зондирование однолучевым гидролокатором дает одномерное, а многолучевым — двумерное отображение структуры ЗРС. В результате единичного зондирования многолучевой системой представляется возможность анализировать структуру ЗРС в реальном времени, чего однолучевой гидролокатор не может обеспечить в принципе. При движении (дрейфе) судна многократное зондирование однолучевой системой дает двумерное, а многолучевой — трехмерное отображение структуры ЗРС. Изложенные преимущества позволяют не только наблюдать поведение ЗРС, но и изучать элементы тонкой структуры, их пространственное расположение в деятельном слое океана и друг относительно друга.

Используемый в экспериментах многолучевой эхолот реализует ненаправленное акустическое излучение в плоскости, перпендикулярной продольной оси судна. Угол раскрытия луча составляет  $60^\circ$ . Длительность посылки 1,0; 0,1 мс; частота заполнения импульса 12 кГц. Принятые на линейную антенну эхосигналы формируются в 15 узконаправленных лучей. Угловой размер каждого луча  $2 \times 4^\circ$ , интервал между посылками определяется скоростью работы накопителя на магнитной ленте и составляет 40 с.

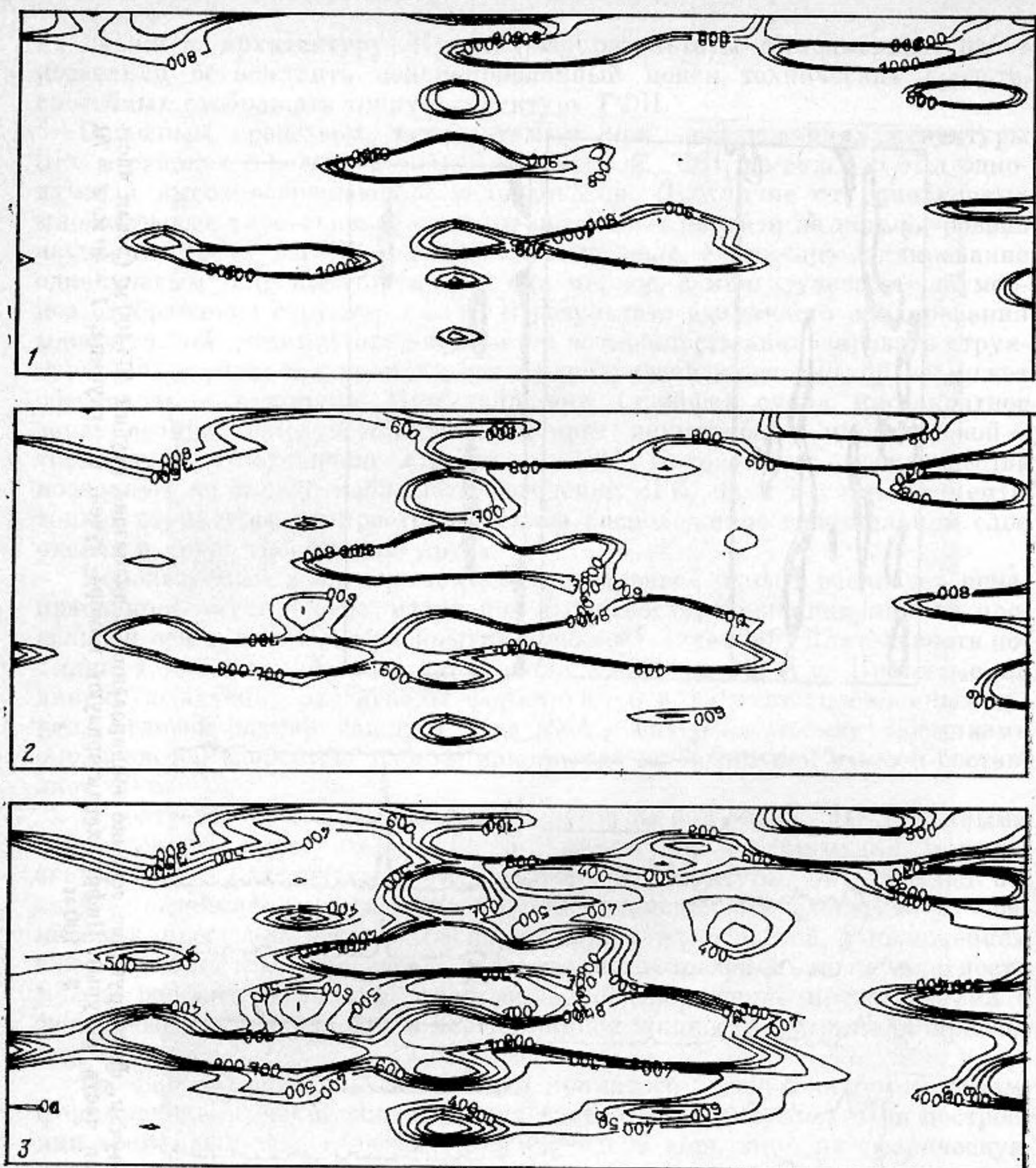
В соответствии с моделью микроструктуры вод океана [1] и данными лабораторного эксперимента [2, 3], в сечении зондирования морской среды могут выделяться элементы тонкой структуры ЗРС в виде областей, ограниченных линиями равной интенсивности эхосигналов. Совпадения пространственного расположения этих областей с положением высокоградиентных прослоек вертикального профиля поля плотности можно рассматривать как качественное подтверждение представлений о формировании каскада пятен перемешанной жидкости в стратифицированной среде.

На фиг. 1 приведены огибающие принятого эхосигнала по 15 лучам, формирующие сечение зондирования (левая часть рисунка). При построении временных зависимостей была проведена коррекция на сферическую расходимость и наклонную дальность лучей. В правой части приведены линии равной амплитуды принятых эхосигналов в этом же сечении, построенные с помощью ЭВМ. Методика построения изолиний отработывалась в серии последовательных зондирований в акваториях Черного и Средиземного морей, а также Атлантического океана. Определенный оптимальный коэффициент усиления системы при работе по ЗРС в интервале 40—200 м в последующих экспериментах не менялся. Методические исследования, выполненные в Черном море, показали, что значения максимума огибающего эхосигнала в сечении зондирования, регистрируемые на цифровом магнитофоне эхолота, после усиления и преобразования составляли 2000 разрядных единиц преобразователя при собственном шуме системы в 10 единиц, что соответствует динамическому диапазону данной системы в выбранном режиме 46 дБ. В работе [6] показано, что при зондировании звукорассеивающих слоев имеет место слабая угловая зависимость обратного рассеяния в случае узкой диаграммы направленности акустической системы. Выполненное исследование указывает на то, что изолинии интенсивности рассеянного сигнала должны качественно соответствовать форме пятен. Приведенные в правой части фиг. 1 изолинии построены между  $-5$  и  $-11$  дБ с интервалом в 2 дБ по отношению к величине максимума огибающей амплитуды принятых эхосигналов.

На фиг. 2 приведены изолинии для одного и того же зондирования, построенные в различных интервалах ослабления эхосигнала дБ:  $-5 \div -8$ ,



Фиг. 1. Огибающие принятого эхосигнала по 15 лучам, формирующие сечение зондирования в диапазоне глубин 40÷100 м (левая часть фигуры), и построенные по ним изолинии (правая часть фигуры). Цифры характеризуют номера лучей.  $Q$  — глубина, 1 — 40 м, 2 — 70, 3 — 100 м



Фиг. 2. Изолинии одного и того же зондирования, построенные через 2 дБ в интервалах ослабления эхосигнала, дБ: 1 —  $-5 \div -8$ , 2 —  $-5 \div -11$ ; 3 —  $-5 \div -14$

$-5 \div -11$  и  $-5 \div -14$ . По мере уменьшения величины нижнего порога изолиний получается более детальная картина инфраструктуры ЗРС. Дальнейшее уменьшение величины порога приводит к существенному «зашумлению» картины. Естественным ограничением порога является разрешающая способность системы, которая при длительности посылки 1 мс составляет по вертикали 1 м. Иными словами, появление в сечении зондирования пятен с характерными размерами по вертикали меньше 1 м свидетельствует о неправильно выбранной величине порога.

Совместный анализ правой и левой частей фиг. 1 показывает, что в принятых эхосигналах четко фиксируется верхняя и нижняя границы пятен, где градиент эхосигналов составляет 1 дБ/м. Учитывая, что разрешающая способность эхолота по горизонтали на глубине 60 м не хуже 3 м, можно оценить размеры получаемых «пятен». Характерные горизонтальные размеры пятен до глубин зондирования 150 м составляли от единиц метров до размеров, выходящих за границы сечения зондирования, т. е. превышающих 100 м. Характерные вертикальные масштабы пятен не превышали 5–7 м.

Приведенные результаты показывают, что получаемые с помощью многолучевого зондирования данные о структуре ГФП значительно расши-

ряют возможности исследования эволюции таких структур [7, 8, 11]. Так, на эхограммах, приведенных в [7, 8], достаточно четко и в большом количестве видны и детерминированные элементы тонкой структуры. Однако их детальное исследование возможно лишь с помощью многолучевых акустических систем.

Таким образом, результаты настоящей работы свидетельствуют о перспективности исследования тонкой структуры ЗРС многолучевыми акустическими системами. Переход к количественным оценкам элементов ГФП, выявляемых по данным многолучевого зондирования, например размеров пятен (вертикального и горизонтального), их формы, требует расширения технических возможностей лоцирующей системы. В первую очередь это относится к возможности увеличения частоты заполнения зондирующего импульса (от 10 до 100 кГц), частоты посылок импульсов (до 1 Гц), а также уменьшения времени посылки до 0,3 мс. Качественного улучшения требует и система быстрого ввода и обработки информации.

Авторы благодарны Г. И. Баренблатту и В. С. Белоконю за ценные замечания при обсуждении результатов работы.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Баренблатт Г. И. Динамика турбулентных пятен и интрузии в устойчиво стратифицированной жидкости // Изв. АН СССР. Сер. ФАО. 1978. Т. 14. № 2. С. 195—205.
2. Абрамян Т. О., Кудин А. М. Эволюция поля плотности между двумя пятнами перемешанной жидкости в стратифицированной среде // Докл. АН СССР. 1983. Т. 271. № 3. С. 725—728.
3. Абрамян Т. О., Кудин А. М. Лабораторное исследование взаимодействия пятен перемешанной жидкости при их растекании в стратифицированной среде // Изв. АН СССР. Сер. ФАО. 1983. № 8. С. 888—891.
4. Андреева И. Б., Макштас Я. П. Внутренние волны и звукорассеивающие слои у слоя скачка температуры // Океанология. 1977. Т. 17. № 3. С. 440—444.
5. Виноградская Н. П., Савагов В. И., Стефанов С. Р. О возможности использования эхолоцирования для изучения неоднородностей водной среды // Океанология. 1980. Т. 20. № 6. С. 1021—1029.
6. Соломатин А. С., Шевцов В. П., Юсупов В. И. Рассеяние звука на тонкой структуре гидрофизических полей в океане // Акуст. журн. 1985. Т. 31. № 6. С. 768—774.
7. Муравьев С. С. О связи структуры звукорассеивающих слоев в океане с гидрофизическими процессами // Океанология. 1984. Т. 24. № 2. С. 251—257.
8. Варлагый Е. П., Шевцов В. П. О методе измерения тонкой структуры поля скорости в океане // Океанология. 1976. Т. 16. № 2. С. 351—357.
9. Биология океана / Под ред. Виноградова М. Е. Т. 1. М.: Наука, 1977. С. 398.
10. Федоров К. Н. Тонкая термохалинная структура вод океана. Л.: Гидрометеиздат, 1976.
11. Любичкий А. А., Розенберг А. Д. О возможности определения глубин залегания термоклина по рассеянию звуковых сигналов // Изв. АН СССР. Сер. ФАО. 1976. Т. 12. № 11. С. 1224—1227.

Институт геохимии и аналитической химии им. В. И. Вернадского Академии наук СССР

Поступила в редакцию 11.XII.1987