

УДК 534.222/.231

## ИСПОЛЬЗОВАНИЕ ШУМОВ СУДНА ДЛЯ ЗОНДИРОВАНИЯ ВЕРХНЕЙ ЧАСТИ ДНА ОКЕАНА

В.Е. Федоров

*Институт динамики геосфер Российской академии наук*

Определение строения и свойств верхней части дна моря представляет значительный научный и практический интерес. Для восстановления характеристик дна в случае мелкого моря автор использовал экспериментальные дисперсионные кривые в широком диапазоне частот и волновых чисел, полученные путем обработки данных о шумах судна-буксировщика, зарегистрированных обычной сейсморазведочной многоканальной буксируемой косой. Расширение частотного диапазона по волновым числам было основано на использовании физических представлений о распространении сейсмоакустических волн. Скорости поперечных волн в самом верхнем слое дна и в следующем слое, а также глубина верхнего слоя были определены методом проб и ошибок. Главным результатом работы является получение экспериментальных дисперсионных кривых в широком диапазоне частот и волновых чисел по шумам судна и с использованием только стандартной сейсморазведочной аппаратуры, а также обоснование возможности определения скорости поперечных волн по этим данным.

## SHIP NOISE APPLICATION FOR VIBROSOUNDING OF THE UPPER PART OF OCEAN BOTTOM

V.E. Fedorov

*Institute for Dynamics of Geospheres, Russian Academy of Sciences*

Reconstruction of elastic properties of the seafloor is an important problem for scientific and technical applications. The author used seismoacoustical radiation of tug-ship in shallow water recorded by ordinary multi-channel horizontal array of hydrophones to obtain experimental dispersion curves in a wide frequency band. He expanded the range of wavenumbers and removed aliasing by taking into consideration physical properties of surface waves. Trial-and-error method is applied to obtain shear wave velocities in the upper layer of the bottom and in the next layer. The depth of the first layer is obtained too. The most important result of this paper is that the author proved the possibility and illustrated the process of obtaining dispersion curves of surface waves in a wide band of frequency and wavenumber and reconstructing shear waves velocities in the upper part of the bottom with the help of an ordinary array of hydrophones and radiation of tug-ship. The result gives us a chance to get more information on the sea bottom structures from already existing data.

## ВВЕДЕНИЕ

Проблема восстановления упругих характеристик и плотности дна океана представляет интерес как с точки зрения фундаментальных исследований, так и с точки зрения инженерных приложений. Скорости продольных волн в дне можно определить при помощи традиционных сейсмических методов. Определение скоростей поперечных волн в дне затруднительно, если колебания возбуждаются и регистрируются в водной толще, поскольку поперечные волны в жидкости не распространяются. Скорость продольных волн в дне может незначительно меняться из-за водонасыщенности пород, при этом скорость поперечных волн становится их существеннейшей характеристикой, отражающей, с одной стороны, свойства этих пород, и, с другой – сильно влияющей на процессы распространения сейсмоакустических колебаний в океане. Существует большая разница между значениями скоростей поперечных волн, измеренных в извлеченных из дна образцах и значениями этих скоростей в месте извлечения пород. Это различие связано с нарушением внутренней структуры извлеченного образца и оно гораздо больше для поперечных волн, чем для продольных. Можно использовать донные станции или косы и даже донные вибраторы, однако этот путь технически сложен и дорогостоящ.

Такая ситуация с определением скоростей поперечных волн в дне океана и явилась одним из источников настоящей работы, другим – была идея использования судна в качестве источника сейсмических волн (подобные колебания наблюдались рядом авторов [1, с.9-31; 2; 3, с.307-327] в ходе проведения специальных экспериментов). Использование шумов судна для определения строения дна можно найти в более поздних работах [4, 5]. Характерной особенностью всех этих работ было то, что шумы судов регистрировались и изучались в узком диапазоне частот.

В ходе эксперимента, описанного в настоящей работе, были получены моды поверхностных сейсмоакустических волн, которые несут информацию о свойствах морского дна. Восстановление свойств дна было основано на сопоставлении экспериментальных и теоретических дисперсионных кривых для этих мод. Такое сопоставление требует знания экспериментальных дисперсионных кривых в широком диапазоне частот. Источником сейсмоакустического излучения в необходимом широком диапазоне частот являлось движущееся судно.

## ЭКСПЕРИМЕНТ

В 1989 г. мы планировали проведение эксперимента в мелком море с использованием специального морского акустического излучателя с частотой 143 Гц. К сожалению, из-за отказа этого источника сигналов мы потерпели неудачу. Но именно эта неудача заставила нас очень подробно исследовать шумы судна и явилась косвенной причиной данной работы. При помощи буксируемой сейсмической косы были зарегистрированы только шумы судна-буксировщика – этого единственного оставшегося доступным источника сейсмоакустических сигналов.

Эксперимент проводился 21 октября 1989 г. в Черном море юго-западнее мыса Тарханкут (п-ов Крым) на судне "Академик Ферсман". Глубина моря в точке проведения эксперимента составляла около 50 м. Географические координаты: 45°20' N и 31°54' E. Скорость звука в воде 1490 м/с, волнение моря 5 баллов, ветер

10° N 14 м/с, скорость судна 4 узла (2 м/с), курс 310°. Опытный профиль 53/89 (32) длиной около 9 км проходил мимо скважины Крымская 1, вблизи скважин Штурмовая 2, Сель 40 и Архангельского 1 и 2.

Судно "Академик Ферсман" водоизмещением 3600 т имело характеристики: мощность машины 3090 кВт, частота вращения двигателя 505 об/мин=8,4 Гц, частота вращения вала 222,5 об/мин=3,7 Гц, 1 винт, 4 лопасти, следовательно, первая лопастная частота составляла 14,8 Гц. Дизельгенератор 500 кВт, 750 об/мин=12,5 Гц.

За судном буксировалась 48-канальная гидрофонная коса ПСК-12. Каждый канал состоял из 31 гидрофона, которые были включены параллельно и располагались через 0,75 м друг от друга. Расстояние между центрами групп гидрофонов равнялось 25 м. Глубина буксировки косы контролировалась специальной системой синтропов и составляла от 8 м на первой секции до 12 м на остальных. База группирования 22,5 м. Пьезоприемники – гидрофоны ПДС-22-2 имели статическую чувствительность 350 мкВ/Па. Минимальное расстояние от кормы судна до косы равнялось 150 м.

Вблизи кормы судна (15 м) находился гидрофон 6ПДС-22-2 с чувствительностью 350 мкВ/Па. Сигнал с него подавался на 48-й канал. Сейсмодатчик СВ-5 был укреплен на конструкциях судна в районе вычислительного центра, сигнал с него выводился на 1 канал.

Запись производилась сейсмостанцией Прогресс-2 N 885. Частота дискретизации составляла 2 мс, длительность записи – 1500 отсчетов или 3 с. Кроме непосредственных измерений, сначала было проведено тестирование приемной системы подачей сигналов различной частоты и амплитуды на вход сейсмостанции. Расстояние между каналами 25 м было слишком велико для детального определения характеристик волнового поля, поэтому в эксперименте на Черном море, как и ранее в эксперименте в Волгограде [6], применялся метод синтетической апертуры. Изменялось относительное положение излучателя и приемной косы. Коса подтягивалась или отпускалась при помощи лебедки на 2,5 м, чтобы разбить интервал 25 м на 10 интервалов по 2,5 м. Отпускание косы производилось 11 раз, затем 11 раз производилось подтягивание. При каждом новом положении косы регистрация проводилась в течении 3 с. Схематически эксперимент показан на рис. 1.

При регистрации был включен фильтр низких частот 125 Гц, и можно было включать или отключать фильтр высоких частот 10 Гц.

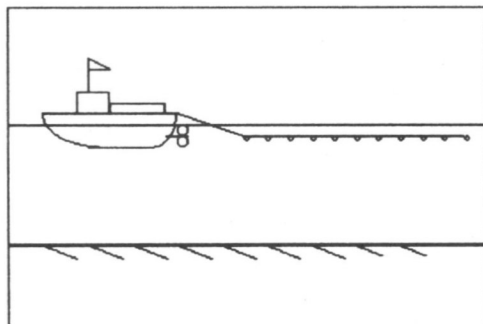


Рис. 1. Схема эксперимента на НИС "Академик Ферсман" в Черном море

Подчеркнем еще раз самую важную особенность эксперимента. Использовалось только стандартное сейсмическое оборудование и не использовались никакие иные источники сейсмических колебаний, кроме шумов самого судна-буксировщика.

### ЧАСТОТНЫЙ АНАЛИЗ ФУРЬЕ

Для определения частотных характеристик волнового поля  $A(t, x)$  был проведен анализ Фурье этих сигналов. Вычислялись амплитудные спектры по каждому каналу при помощи стандартной программы FFTСС по всем 1500 точкам. Эта программа считает разложение в ряд Фурье по следующей формуле [7, с. 168]:

$$f_k = 2/N \sum_{j=1}^N a_j \exp(-2\pi i k j / N), \quad k = 1, \dots, N/2 \quad (i - \text{мнимая единица}),$$

где  $N$  – число точек временного ряда ( $N = 1500$  в нашем случае),  $a_j$  – значения членов временной последовательности на каком-либо канале (все они действительные),  $f_k$  –  $k$ -й член ряда Фурье. Очевидно, что  $f_k$  – комплексные величины, характеризующиеся амплитудой и фазой. Суммы амплитудных спектров сигналов с каналов 2–46 (каналы 1 и 48 были служебными, а канал 47 был исключен по техническим причинам) в 4-х диапазонах частот представлены на рис. 2 для одного из положений косы ( $N = 52$ ) относительно кормы судна.

Необходимо отметить несколько важных особенностей полученной спектральной картины акустического излучения судна.

1. Судно излучает непрерывные сейсмоакустические колебания в широком диапазоне частот от 3 до 200 Гц, при этом амплитуда сигналов для различных частот отличается не более чем в 15 раз.

2. Можно различить характерные пики, соответствующие вальной частоте 3,7 Гц и первой лопастной частоте 14,8 Гц.

3. Судно является не только широкополосным, но и сложным по спектральному составу акустическим излучателем, большинству пиков в частотном спектре которого затруднительно сопоставить источники излучения на борту судна: в частности, в спектрах присутствует много пиков большой амплитуды, которым нельзя поставить в соответствие гармоники вальной или лопастной частот.

### ДВУМЕРНЫЙ АНАЛИЗ ФУРЬЕ

Разложение в ряд Фурье по расстоянию для комплексного ряда  $f_{kj}$ , полученного в результате разложения временного ряда по частотам, вычислялось по формуле

$$b_{km} = 1/L \sum_{j=1}^N f_{kj} \exp(2\pi i m j / L); \quad k = 1, \dots, N, i - \text{мнимая единица},$$

где  $L$  – число выбранных каналов ( $L = 45$  в нашем случае),  $f_{kj}$  – значения членов разложения в ряд Фурье для  $j$ -го канала и  $k$ -й частоты. В результате получаем набор комплексных чисел  $b_{km}$ , каждое из которых характеризует колебания  $k$ -й частоты и  $m$ -й пространственной частоты, т.е. величины обратной длине волны.



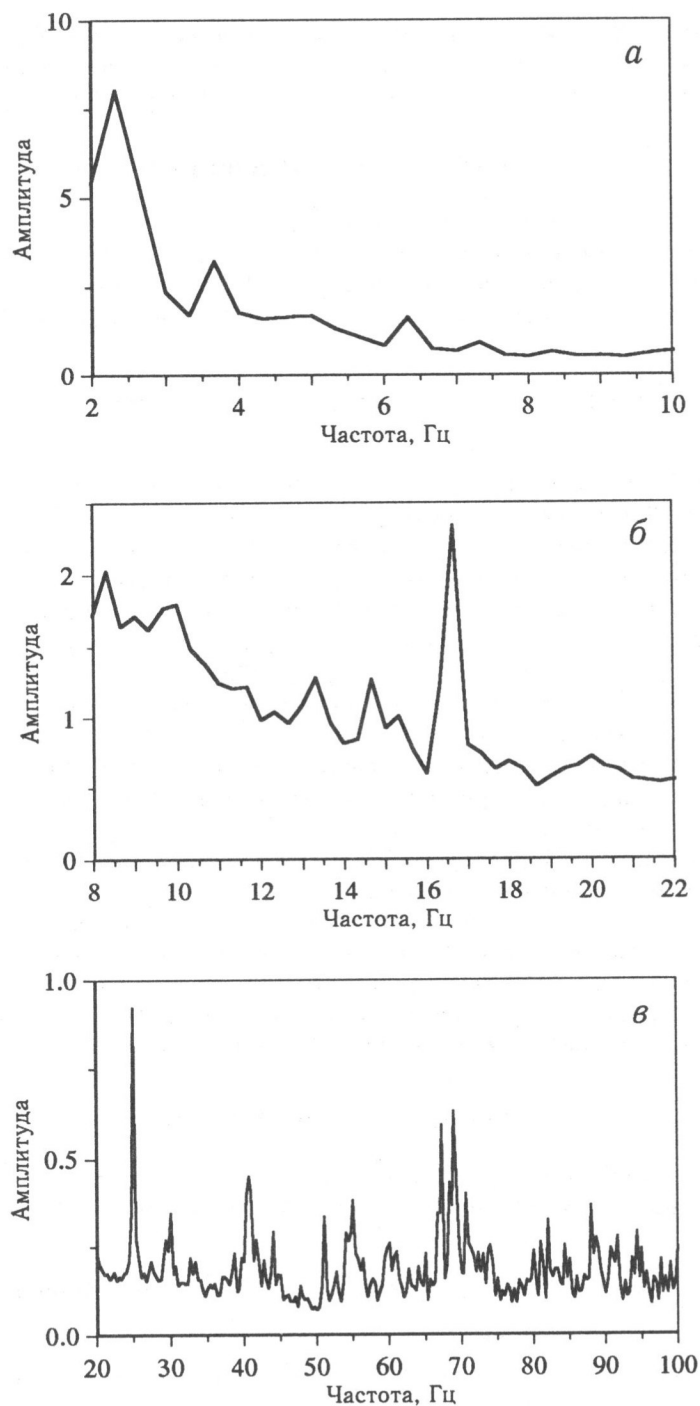


Рис. 2. Суммарные амплитудные спектры сигналов с каналов 2-46 в диапазонах частот: 2-20 Гц (*a*), 8-22 Гц (*б*), 20-100 Гц (*в*), 100-200 Гц (*г*)

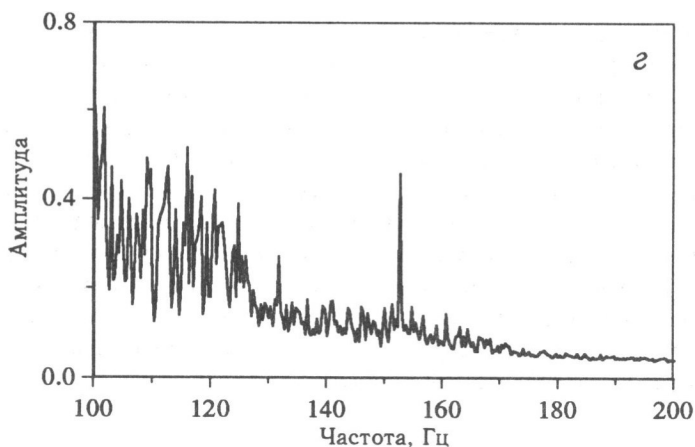


Рис. 2. Окончание

Мы получаем двумерное разложение исходного волнового поля  $A(t, x)$  в ряд по частоте и волновому числу (точнее – по величине, обратной длине волны, которую в дальнейшем везде будем называть волновым числом) :

$$A(t, x) = \sum_{k=1}^N \sum_{m=1}^L b_{km} \exp(2\pi i(f_k t - l_m x)),$$

где  $l_m = 1/\lambda_m$ ,  $\lambda_m$  – длина волны,  $N = 750$ ,  $L = 45$ . Отметим, что значения  $A(t, x)$  должны быть действительными, хотя  $b_{km}$  – комплексные. Это разложение представляет собой разложение по волнам, бегущим вдоль границы раздела.

Получив набор  $b_{km}$ , представим амплитуды этих чисел в виде поверхности над плоскостью частота–волновое число (рис. 3). При этом ряд для каждой частоты нормирован на сумму всех значений ряда для той же частоты. Необходимость нормировки обусловлена большим различием амплитуд  $b_{km}$  для разных частот.

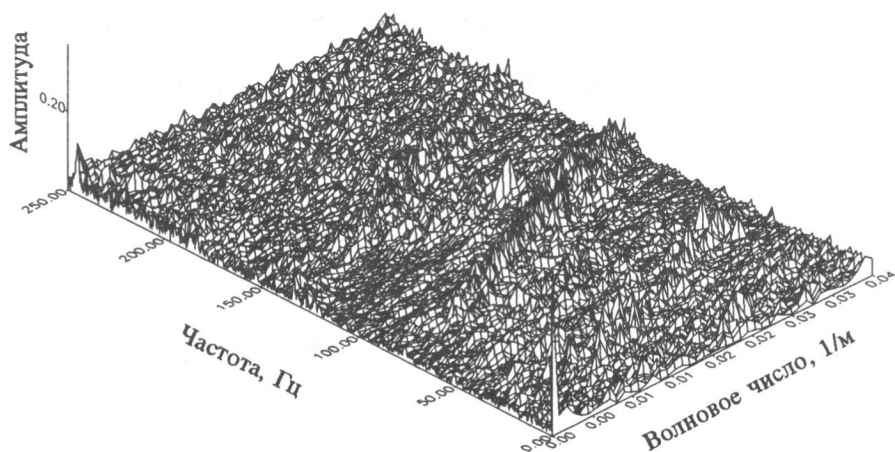


Рис. 3. Нормированная поверхность разложения Фурье по времени и расстоянию

Для дальнейшего рассмотрения разумно представить полученную поверхность в виде карты рельефа (рис. 4, *a*), на которой области выше определенного фиксированного уровня закрашены черным цветом, области ниже другого фиксированного уровня – белым, и введена одна градация серого цвета. Так же строится географическая карта рельефа земной поверхности, если позволить себе такое сравнение.

На карте рельефа (рис. 4, *a*) отчетливо выделяются наклонные линии – ”горные хребты”, которые могут быть интерпретированы как моды поверхностных волн, бегущих в горизонтальном направлении. Поскольку любой точке на карте соответствует своя частота и волновое число (*a* значит, и фазовая скорость), то изменение положения пика вдоль такого хребта при изменении частоты позволит оценить дисперсию моды. В результате идентификации сигналов мы получили экспериментальные дисперсионные кривые.

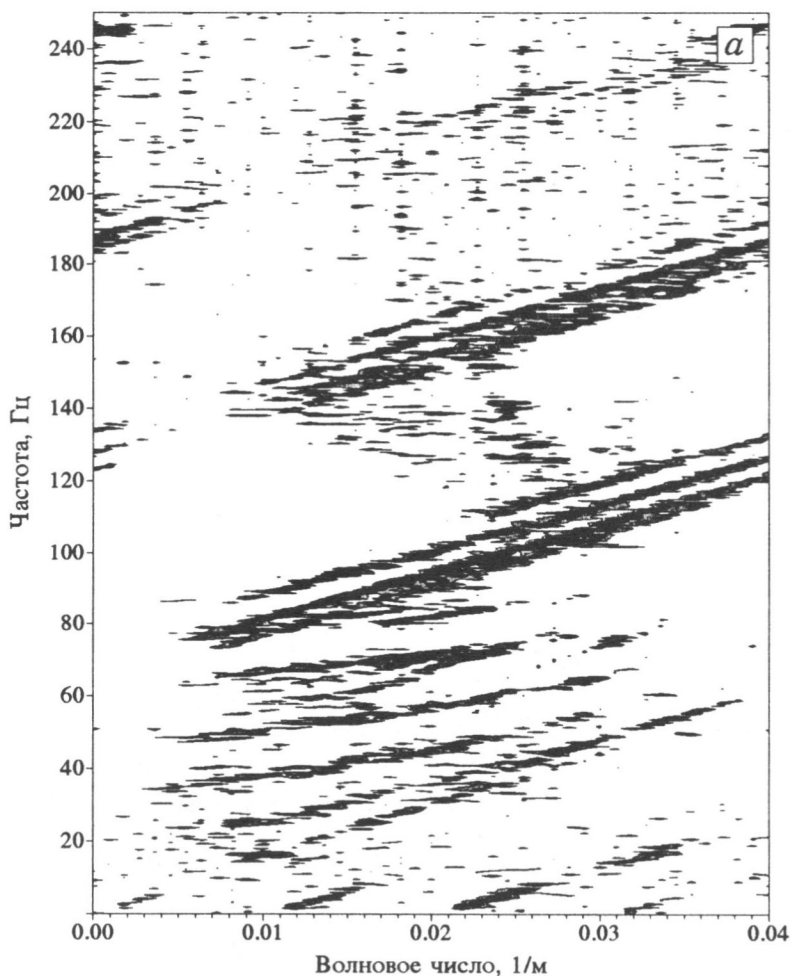


Рис. 4. Карта поверхности разложения Фурье по времени и расстоянию

## ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ ДИСПЕРСИОННЫЕ КРИВЫЕ

При дальнейшем рассмотрении полученных карт можно обнаружить, что некоторым из наклонных линейных структур соответствуют чрезмерно большие значения фазовых скоростей. Это означает, что структуры с большими значениями волновых чисел перенесены в область малых волновых чисел. Такой перенос вызван слишком большим расстоянием между каналами, т.е. недостаточной дискретизацией по расстоянию. Это явление, хорошо известное в частотной области, носит название элайзинга, или образования зеркальных частот [8]. Для восстановления исходной картины необходимо правильно соотносить наклонные линейные структуры с диапазоном пространственных частот.

Выбранная нами последовательность действий очень проста.

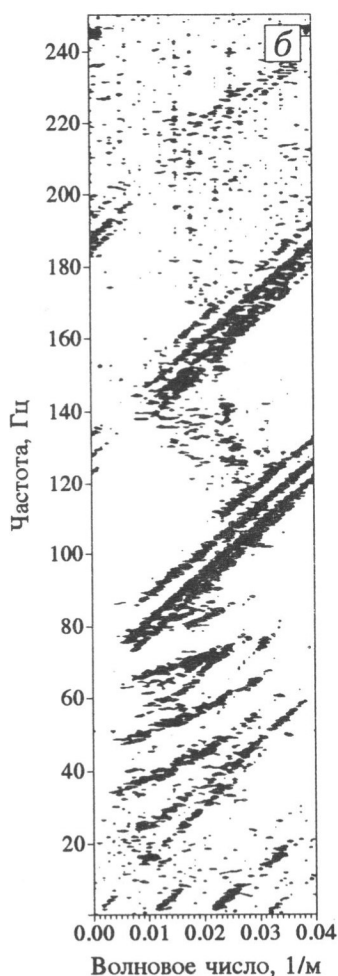


Рис. 4, б представляет собой карту рис. 4, а, но с измененным масштабом вдоль оси абсцисс. На рис. 4, в карта рис. 4, б повторена 3 раза и соединена в одну. Далее необходимо удалить из полученной картины ложные наклонные линейные структуры в соответствии с нашим представлением о поведении дисперсионных кривых поверхностных сейсмических волн. Рассматриваемая карта (рис. 4, в) разделена далее на три области: 1 – область в окрестности прямой, соответствующей скорости звука в воде 1490 м/с, 2 – область выше области 1, 3 – область ниже области 1.

На рис. 4, в проведены 3 прямые линии, соответствующие возможной скорости волн Стоунли в дне 750 м/с, скорости звука в воде 1490 м/с, и скорости 4000 м/с.

Из области 2 исключим линейные структуры с нереально большими фазовыми скоростями. Из области 3 исключим те линейные структуры, фазовая скорость вдоль которых растет с частотой. Будем считать требование прямой дисперсии поверхностных волн верным в нашем случае. Утверждение – дисперсия нормальна в средах без волноводов. Видимо, оно верно, хотя строгое доказательство этого факта нам не известно.

К сожалению, картина остается недостаточно ясной для частот ниже 70 Гц, и, в особенности, для частот ниже 20 Гц. Эта неясность проистекает из технических особенностей системы приема, использованной в ходе проведения эксперимента: слишком малой длины косы для таких частот, слишком большим расстоянием между каналами и группированием гидрофонов в каждом из каналов (сигнал с каждого из каналов представлял собой сумму сигналов с 31 гидрофона группы).

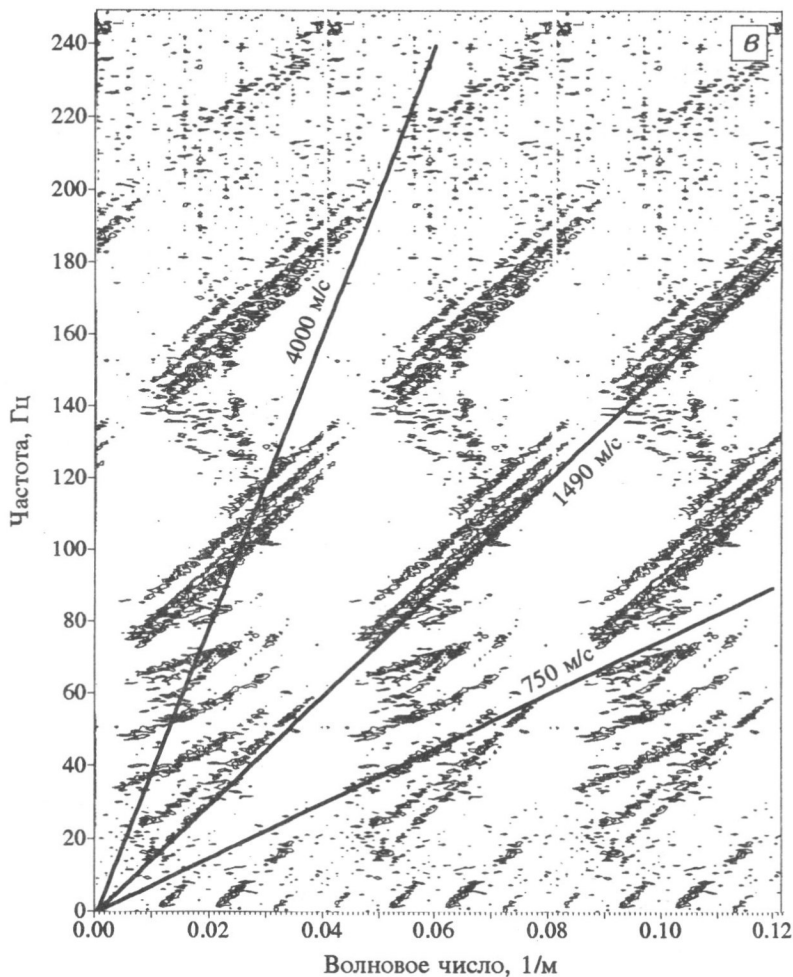


Рис. 4. Окончание

Даже после исключения нефизичных наклонных линейных структур остается несколько участков структур, которые невозможно однозначно по нашим данным соотнести с определенным диапазоном волновых чисел.

Полученная нами карта состоит из трех довольно отчетливых областей по волновым числам. Сигналы же между этими областями подавлены из-за группирования гидрофонов в каждом канале. Отсутствие связности этих областей приводит к неоднозначности восстановления дисперсионных кривых. Все усложняется еще тем, что отдельный участок экспериментальной дисперсионной кривой может в реальности быть суммой двух участков, принадлежащих двум различным дисперсионным кривым. Очевидно, мы не сможем их разделить, опираясь исключительно на наши данные.

Все указанные выше причины осложняют проблему восстановления дисперсионных кривых. Мы сохраним участки дисперсионных кривых для обеих областей волновых чисел, если не можем однозначно соотнести их с каким-либо одним диапазоном волновых чисел, но при дальнейшей интерпретации будем использовать не все, а только часть сохраненных участков (рис. 5).

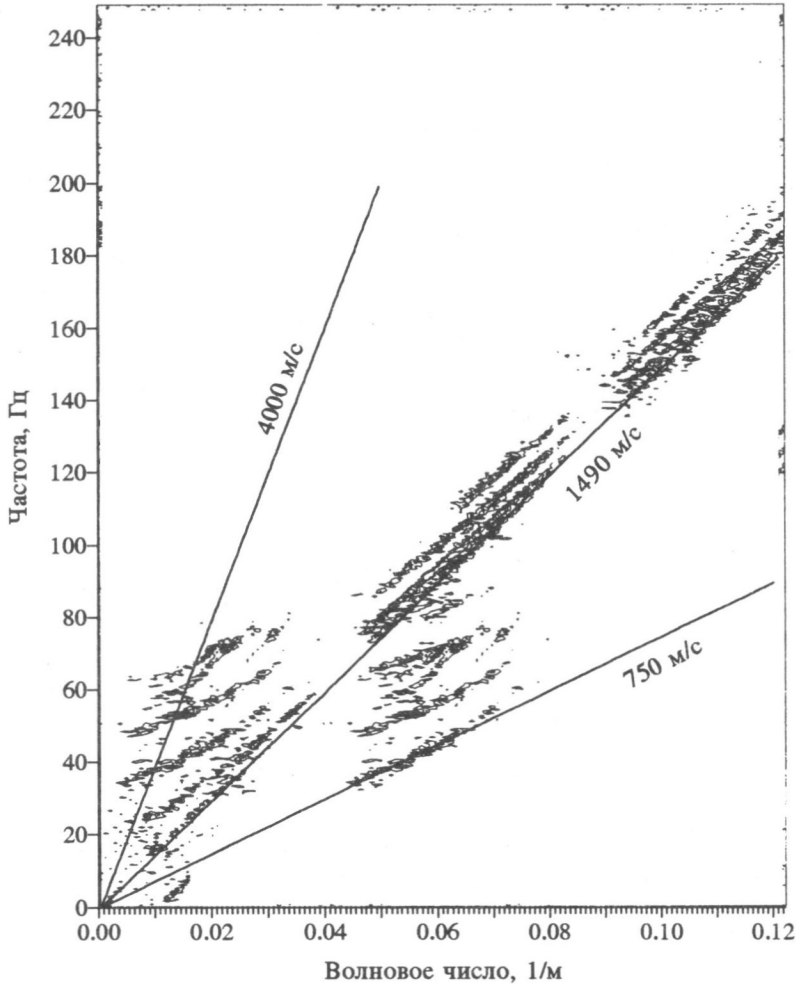


Рис. 5. Дисперсионные кривые

Сравним далее полученную картину с теоретическими дисперсионными кривыми.

### ОБРАТНАЯ ЗАДАЧА

Определение строения среды по дисперсионным кривым поверхностных волн представляет собой сложную математическую проблему, всестороннее рассмотрение которой, к сожалению, далеко от завершения. Важно продемонстрировать принципиальную возможность интерпретации зарегистрированных сигналов, как

мод поверхностных волн, и восстановления характеристик верхней части дна по шумам, излучаемым судном.

Сформулируем ниже важнейшую особенность, относящуюся к поведению дисперсионных кривых поверхностных волн, которые распространяются в среде, состоящей из жидкого слоя, лежащего на слоистом упругом полупространстве [9]. Поведение дисперсионных кривых в наибольшей степени зависит от скоростей поперечных волн и глубины границ слоев. Влияние скоростей продольных волн и плотности существенно меньше.

Обратная задача решалась методом подбора. При этом перебирались только скорости поперечных волн в верхних слоях дна и глубины слоев. Тот факт, что ветви экспериментальной дисперсионной кривой пересекают прямую, соответствующую скорости звука в воде, означает, что фазовая скорость поперечных волн в верхних слоях дна меньше, чем скорость звука в воде [10].

Теоретические дисперсионные кривые рассчитывались по программе DISPER80 M.Sato [11]. Результаты расчета для среды, параметры которой приведены в табл. 1 и табл. 2, представлены на рис. 6. При этом плотности и скорости продольных волн были взяты по независимым соображениям и зафиксированы, поскольку мало влияют на поведение дисперсионных кривых. На первом шаге определялась скорость поперечных волн в самом верхнем слое дна. Для этого мы добивались наилучшего совпадения первых 3-х ветвей теоретической дисперсионной кривой с 3-мя самыми нижними участками экспериментальной кривой в диапазоне волновых чисел от 0,04 до 0,08 1/м (см. табл. 1 и рис. 6,а).

ТАБЛИЦА 1

Толщина слоя, км	Параметры среды		
	Плотность, г/см <sup>3</sup>	Скорость волны P, км/с	Скорость волны S, км/с
0.052	1.0	1.49	0
0.033	2.0	1.6	0.9
Полупространство	2.8	3.0	2.0

На втором шаге определялась глубина верхнего слоя и скорость поперечных волн в нем и под ним. Как и на первом шаге для этого мы добивались наилучшего согласования между первыми 4-мя ветвями теоретической дисперсионной кривой и 4-мя самыми нижними участками ветвей экспериментальной дисперсионной кривой (см. табл. 2 и рис. 6,б).

ТАБЛИЦА 2

Толщина слоя, км	Параметры среды		
	Плотность, г/см <sup>3</sup>	Скорость волны P, км/с	Скорость волны S, км/с
0.052	1.0	1.49	0
0.030	2.0	1.6	0.9
0.100	2.3	1.7	1.1
Полупространство	2.8	2.7	1.9



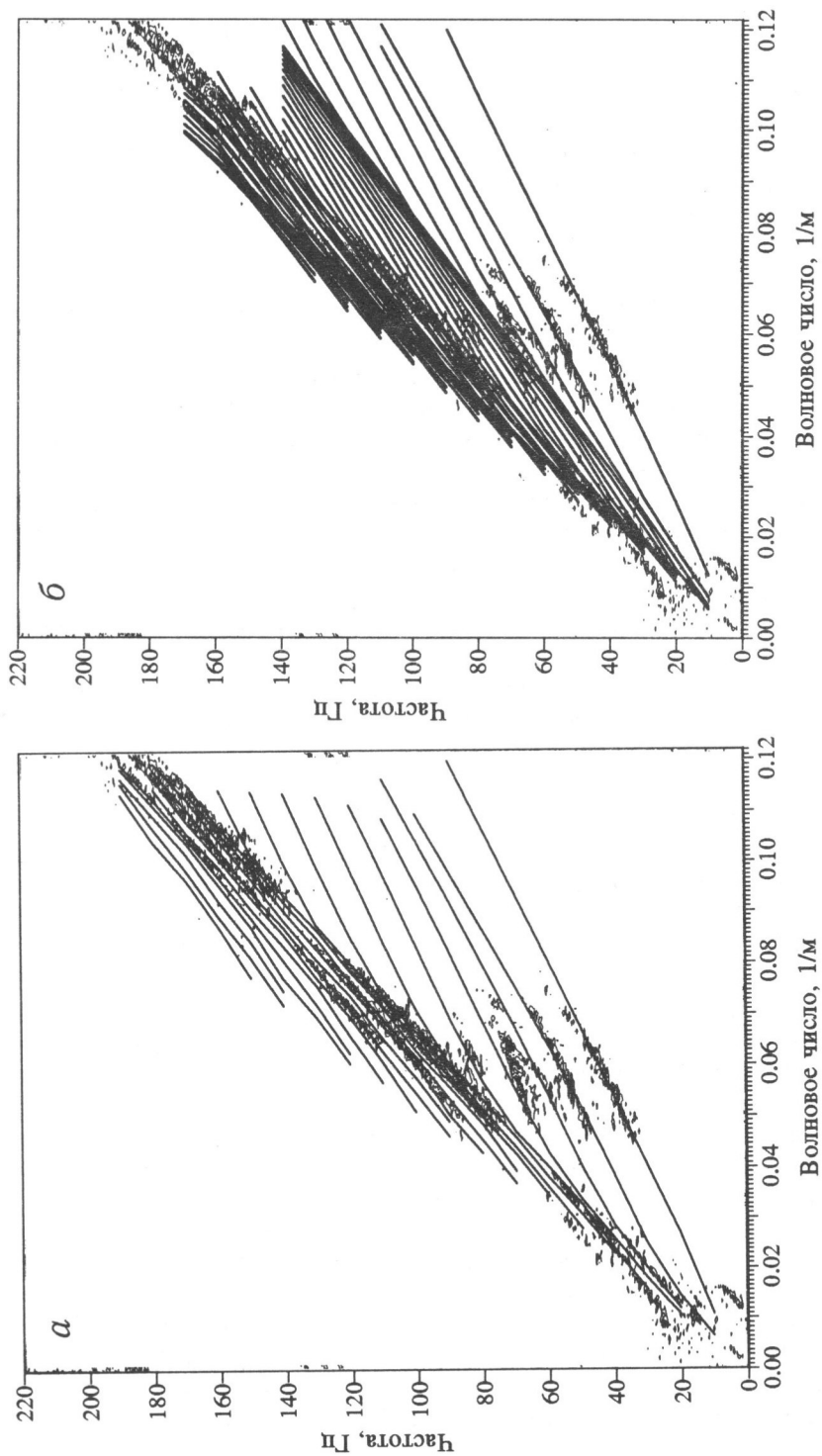


Рис. 6. Теоретические и экспериментальные дисперсионные кривые для среды с параметрами, приведенными в табл. 1(а) и в табл. 2(б)

Естественно, полученные результаты являются предварительными и определение строения среды для больших глубин будет продолжено.

Важно отметить наиболее существенные результаты решения обратной задачи – получены скорости поперечных волн в верхнем слое дна моря и в следующем слое, определена глубина верхнего слоя дна;

– результаты не противоречат данным, полученным по каротажу ближайших скважин и существенно дополняют их.

Итак в работе показано, что

1) судно излучает непрерывные сейсмоакустические колебания в широком диапазоне частот от 3 до 200 Гц, при этом амплитуда сигналов для различных частот отличается не более чем в 15 раз;

2) эти колебания регистрируются в воде при помощи стандартного сейсморазведочного оборудования – многоканальной приемной косы гидрофонов;

3) применяя двумерное преобразование Фурье по времени и расстоянию можно получить экспериментальные дисперсионные кривые;

4) используя примененный автором подход к устранению пространственного элайзинга, основанный на представлении о характере колебаний, экспериментальные дисперсионные кривые можно получить для широкого диапазона частот и волновых чисел;

5) используя экспериментальные дисперсионные кривые, можно определить значения скоростей поперечных волн, по крайней мере, в верхней части дна. Для проведенного эксперимента при глубине моря 50 м, скорость поперечных волн в дне восстановлена в слое толщиной 30 м (и толщина слоя), а также скорость поперечных волн в следующем слое.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

1. Предложенный метод можно использовать для определения строения среды по шумам различных неспециальных источников непрерывных, длительных во времени колебаний, излучаемых нефтяными платформами, бурильными установками, турбинами электростанций.

2. Описанный подход позволяет использовать уже существующие записи судов, полученные донными сейсмическими станциями, сейсмическими косами (в том числе донными) и вертикальными антеннами гидрофонов. Обработка подобных наблюдений позволит получить совершенно новые данные о скоростях поперечных волн в дне моря.

3. Определение скоростей поперечных волн в верхних слоях дна может существенно дополнить наши знания о верхнем слое морских осадков и о распространении сейсмоакустических колебаний в море.

4. Результаты восстановления скоростей поперечных волн в верхних слоях дна могут быть использованы для подавления многократных мешающих отражений, особенно, в мелком море. Существует множество способов подавления этих отражений при обработке записей. Однако несмотря на значимость информации о скоростях поперечных волн в верхних слоях дна при рассмотрении многократных отражений, она не используется именно из-за трудностей ее получения.

5. Использование непрерывных колебаний, излучаемых различными неспециальными источниками, позволяет проводить непрерывный мониторинг состояния

среды, например, вблизи корабельных трасс, электростанций или работающих промышленных установок.

Выражаю искреннюю признательность В.М. Маркушевичу за его неоценимую помощь и поддержку и Л.И. Когану, начальнику экспедиции на НИС "Академик Ферсман".

Настоящая работа была частично поддержана Российским фондом фундаментальных исследований (грант 97-05-65629).

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Росс Д. Шумы: источники, излучение и ослабление // Подводная акустика и обработка сигналов. М.: Мир, 1985. С.9-31.
2. Шмальфельд Б., Раух Д. Низкочастотные окружающие шумы и шумы, производимые судном в мелкой воде // Акустика дна океана. М.: Мир, 1984. С.227-239.
3. Rauch D. Experimental and theoretical studies of seismic interface waves in coastal waters // Bottom-interacting ocean acoustics. N-Y.-L. 1980. P.307-327.
4. Ильинский Д.А. Частотное сейсмическое зондирование морского дна // Докл. РАН. 1991. Т.316, N 6. С.1362-1366.
5. Курьянов Б.Ф., Веденев А.И. Исследования метода профилирования осадочной толщи дна в глубоком море с использованием шумов судоходства // Океанология. 1994. Т.34, N 4. С.621-628.
6. Бродов Л.Ю., Локцик В.В., Маркушевич В.М. и др. Опыт монохроматического зондирования верхней части разреза с помощью горизонтального вибратора // Современные методы интерпретации сейсмологических данных. (Вычисл. сейсмология. Вып. 24). М.: Наука, 1991. С.171-185.
7. Бат Маркус. Спектральный анализ в геофизике. М.: Недра, 1980. 535 с.
8. Шерифф Р., Гелдарт Л. Сейсморазведка. Т.2. М.: Мир, 1987. 400 с.
9. Маркушевич В.М., Федоров В.Е. Волновые числа в задаче о колебаниях жидкого слоя на упругом полупространстве // Теория и алгоритмы интерпретации геофизических данных. (Вычисл. сейсмология. Вып. 22). М.: Наука, 1989. С.146-152.
10. Кейлис-Борок В.И. Интерференционные поверхностные волны. М.: Изд. АН СССР. 1960. 195 с.
11. Seismological Algorithms. Academic Press. 1988. 412 p.