

МОДЕЛИРОВАНИЕ ВИБРОЗОНДИРОВАНИЯ КОНКРЕТНОЙ ГЕОЛОГИЧЕСКОЙ СТРУКТУРЫ ГОРИЗОНТАЛЬНЫМИ МОНОХРОМАТИЧЕСКИМИ ВИБРАЦИЯМИ

О.А. Макеев, В.М. Маркушевич, Г.М. Стеблов

MODELING OF VIBRO SOUNDING FOR A GEOLOGIC FEATURE USING HORIZONTAL MONOCHROMATIC VIBRATIONS

O.A. Makeev, V.M. Markushevich and G.M. Steblov

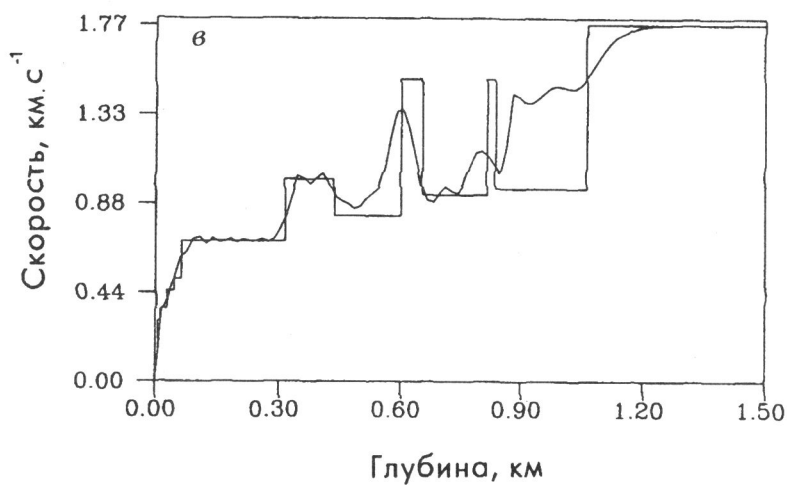
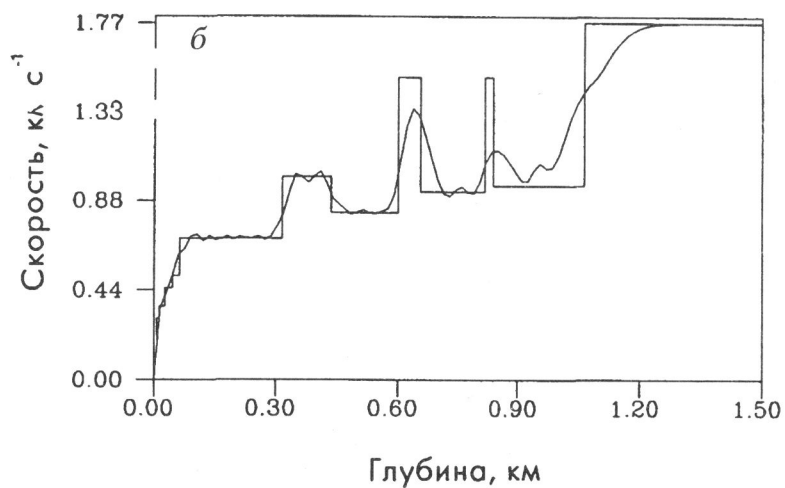
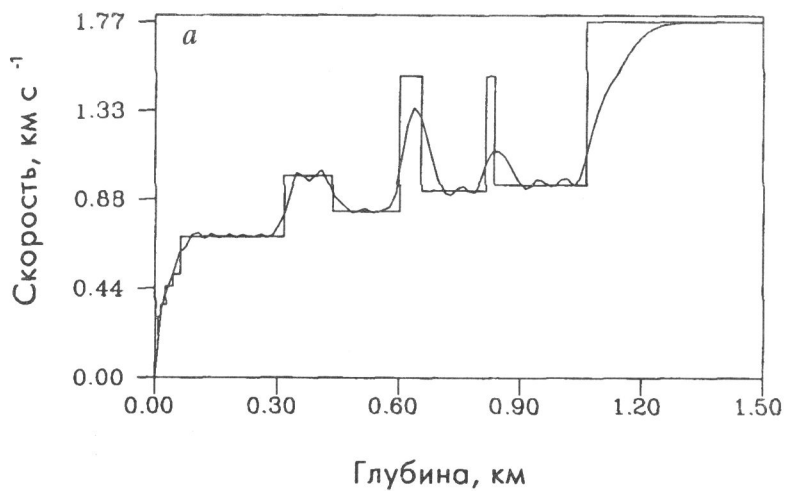
A geologic structure with several waveguides is used to illustrate the determination of SH velocity from Love modes excited by a low frequency monochromatic surface source. The velocity distribution in a waveguide becomes available through the technique, though in a smoothed form, if the thickness of waveguide lid is less than wavelength of the monochromatic signal.

Геологический разрез для конкретной тестовой площадки, с которым мы будем иметь дело в этой статье, был предложен сейсморазведчиками (табл. 1). Предполагалось обработать данные взрывных работ, проведенных на этой площади, с помощью тау-метода. Такая работа была проведена, но при этом возникли значительные трудности, так как скоростной разрез содержит три волновода (рис. 1,а). Крышки этих волноводов – т.е. высокоскоростные слои – сравнительно тонкие. Поэтому возникла мысль исследовать возможность восстановить строение такой среды с помощью не взрывного, а низкочастотного монохроматического воздействия.

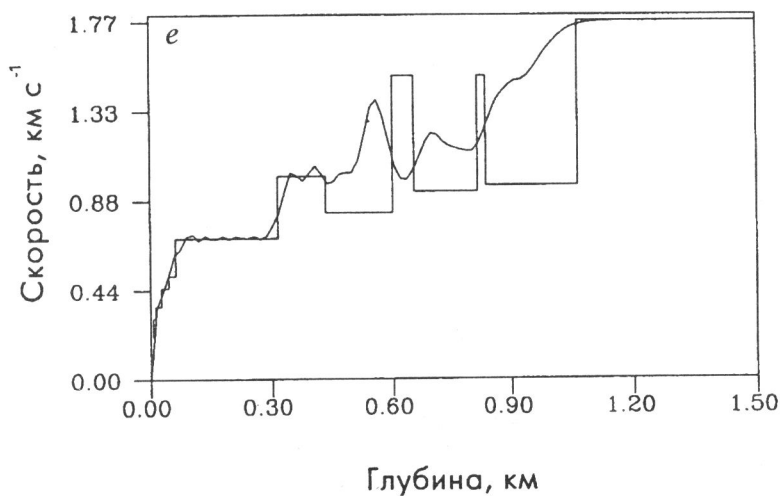
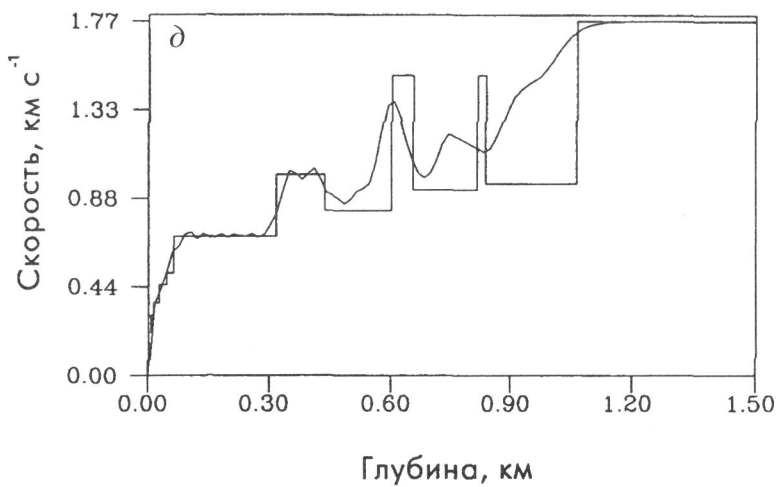
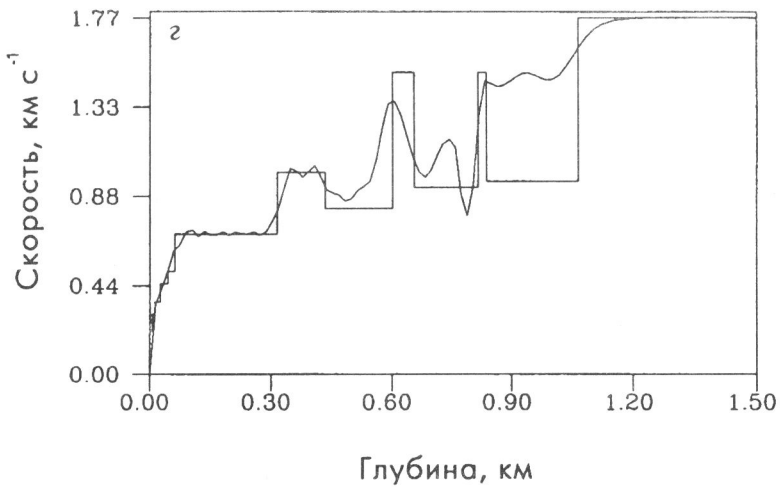
Прямая и обратная задачи монохроматического зондирования с использованием горизонтального вибратора рассматривались в [1, 2], где содержатся ссылки на предшествовавшие работы. Для решения обратной задачи используются характеристики мод поверхностных волн Лява – амплитуды и волновые числа. Они определяются с помощью Бессель-трансформации амплитуд и фаз монохроматических колебаний точек поверхности, измеренных вдоль прямолинейного профиля, который начинается в источнике. Аргументом преобразования Бесселя является расстояние точки измерения от источника.

Таблица 1

№	Формация	V_p , км/с	V_s , км/с	ρ , г/см ³	Глубина, м
1	Wills Point Gr.	0.732	0.214	1.6	0
2	Wills Point Gr.	1.104	0.305	2.0	7
3	Wills Point Gr.	1.525	0.366	2.1	13.5
4	Wills Point Gr.	1.678	0.458	2.1	27.5
5	Wills Point Gr.	1.769	0.519	2.1	45.8
6	Wills Point Gr.	2.059	0.708	2.2	64.1
7	Kinkaid Shale	2.059	0.708	2.2	168
8	Arkadelphia Marl	2.059	0.708	2.25	244
9	Nacatoch Sand	2.410	1.022	2.2	320
10	Nacatoch Sand	2.227	0.839	2.25	442
11	Taylor Marl	2.227	0.839	2.25	519
12	Pecan Gap Chalk	3.203	1.525	2.45	610
13	Taylor Group	2.501	0.946	2.3	665
14	Goher Chalk	3.203	1.525	2.45	830
15	Taylor Group	2.593	0.976	2.3	851
16	Austin Chalk	3.584	1.800	2.5	1080
17	Buda Lime	4.346	2.181	2.5	1525



Р и с. 1. Результат восстановления скорости SH-волн для частоты 10Гц
а — по всем модам, *б* — *в* — последовательное исключение слабейшей из оставшихся мод



Характеристики моды при 10 Гц

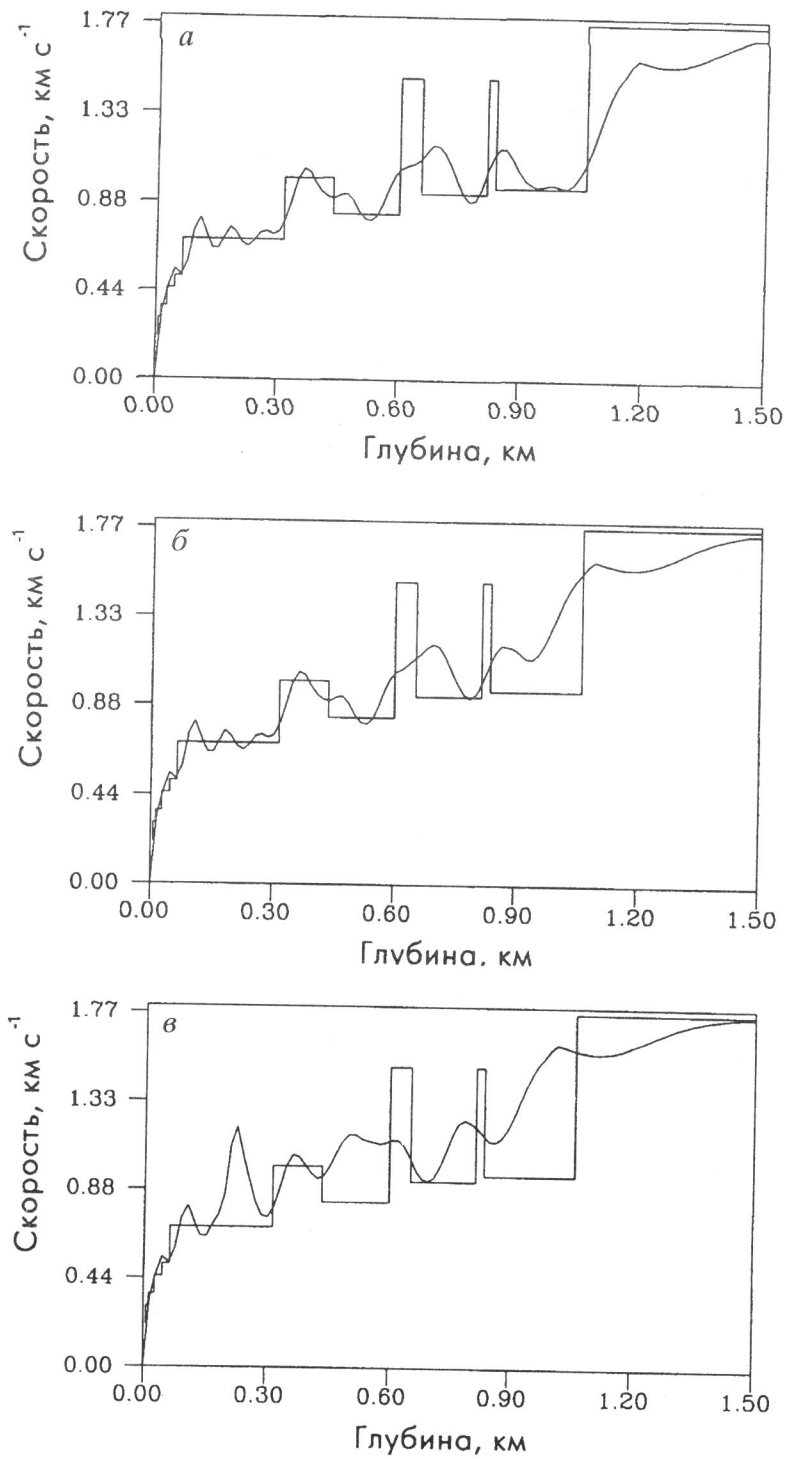
Номер моды	Волновое число	Амплитуда	Номер моды по возрастанию амплитуды	Номер моды	Волновое число	Амплитуда	Номер моды по возрастанию амплитуды
1	250.69181	169.6869	23	13	53.393939	0.000002	1
2	143.71494	19.75628	22	14	49.538371	0.105846	9
3	106.55690	11.25140	21	15	48.577609	0.000203	4
4	82.372544	0.247924	11	16	45.865929	0.009221	7
5	80.399354	0.679338	16	17	44.738584	0.382682	13
6	76.865322	0.915156	18	18	39.396033	0.007275	6
7	71.469758	0.958864	20	19	38.088053	0.468737	15
8	65.226898	0.000069	2	20	31.397084	0.104248	8
9	63.882382	0.938179	19	21	28.645684	0.432712	14
10	58.730056	0.000877	5	22	22.180074	0.124887	10
11	54.715180	0.000078	3	23	14.711899	0.276577	12
12	54.187636	0.081020	17				

Для уверенного выделения мод по этим данным должны соблюдаться, по крайней мере, два условия: сейсмометры и записывающие системы должны иметь подходящий динамический диапазон и амплитуды отдельных мод не должны сильно различаться. Эти требования взаимосвязаны: усиливая одно, мы можем ослабить другое. На них влияют также условия измерения – шум, отклонения среды от горизонтальной однородности и т.д. Кроме того, объединяя источники в антенны, можно усилить одни моды на фоне других. Положительную роль может сыграть и повышенное затухание волн в приповерхностных слоях, подавляя сильные моды с наибольшими волновыми числами и тем самым увеличивая возможность наблюдения мод, которые глубже проникают в среду и соответствуют меньшим волновым числам.

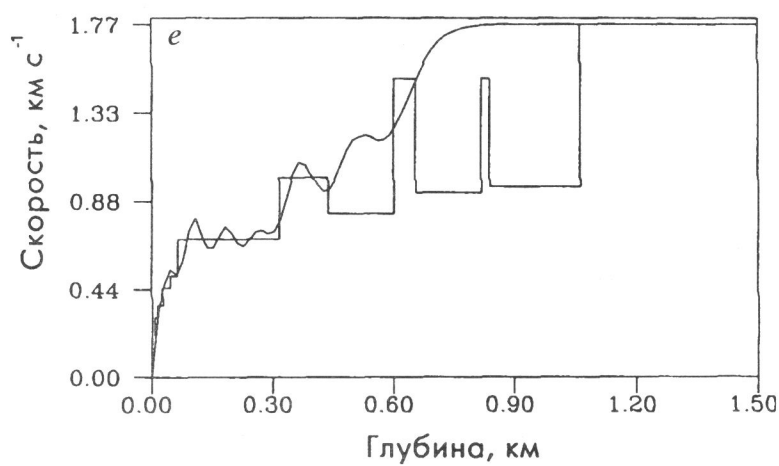
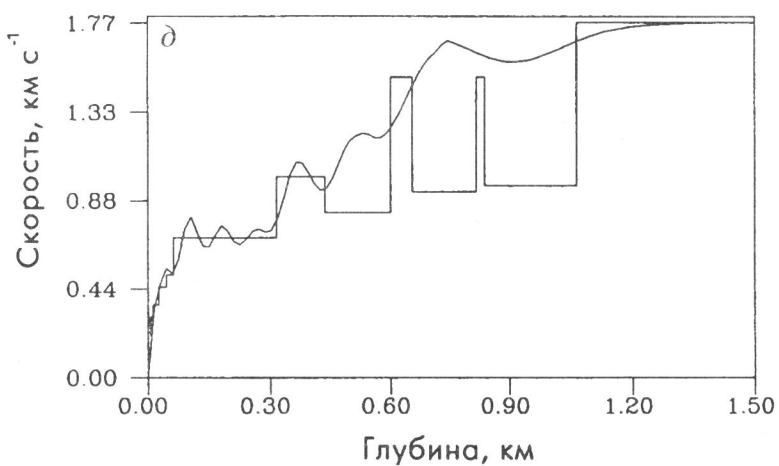
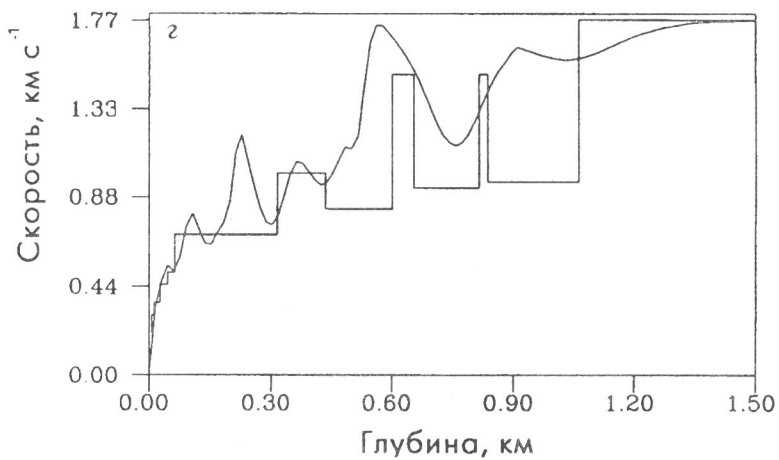
Поэтому приводимые ниже в виде таблиц и рисунков результаты вычислений дают лишь приближенное представление о возможностях метода. Мы предполагаем, что среда идеально упругая. Зондирование ведется крутильным источником, сосредоточенным вблизи начала координат с единичным крутящим моментом. Для каждой из рассмотренных частот приведена таблица характеристик Лявовских мод и серия рисунков, изображающих исходный разрез и решение обратной задачи. В каждой таблице моды упорядочены по возрастанию волновых чисел; правая колонка указывает на порядок мод по другому критерию – возрастанию амплитуды.

Серия графиков, соответствующая частоте зондирования 10 Гц, приведена на рис. 1, *a–e*, где ломаной линией показан исходный разрез, а волнистой – результат восстановления скорости SH-волн. Рис. 1а, на котором скорость SH-волн определяется по всем 23 модам (табл. 2), показывает, что скорость в волноводах восстанавливается довольно хорошо. С помощью лучевых методов этого добиться принципиально невозможно. К недостаткам восстановления относится то, что крышки второго и третьего волноводов прослеживаются на графике в очень сглаженном виде.

Из табл. 2 видно, что амплитуды мод различаются на 8 порядков. Что случится, если самая слабая – мода с номером 1 в последней колонке – не будет замечена при обработке? Ответ дает рис. 1, *б*, где обратная задача решена по всем модам за исключением слабой. Результат почти тот же, что и на предыдущем графике, исключая последний волновод, точность восстановления которого ухудшилась. Рис. 1, *в–e* показывают, как ухудшается точность восстановления разреза при последовательном исключении слабейших мод: с номером 2 в последней колонке на рис. 1, *в*,



Р и с. 2. Результат восстановления скорости SH-волн для частоты 5Гц
a — по всем модам, *б—с* — последовательное исключение слабой из оставшихся мод



Р и с. 2 (окончание)

Характеристика моды при 5 Гц

Номер моды	Волновое число	Амплитуда	Номер моды по возрастанию амплитуды	Номер моды	Волновое число	Амплитуда	Номер моды по возрастанию амплитуды
1	97.89344	68.76916	12	7	25.39028	0.01665	1
2	47.20748	7.31905	11	8	23.80260	0.02496	3
3	39.62346	0.47397	6	9	21.35533	0.58544	8
4	34.26320	1.19858	10	10	16.90556	0.12360	4
5	30.30172	0.02071	2	11	13.53614	0.52065	7
6	26.19138	1.12014	9	12	6.53220	0.30224	5

Таблица 4

Характеристики моды при 4 Гц

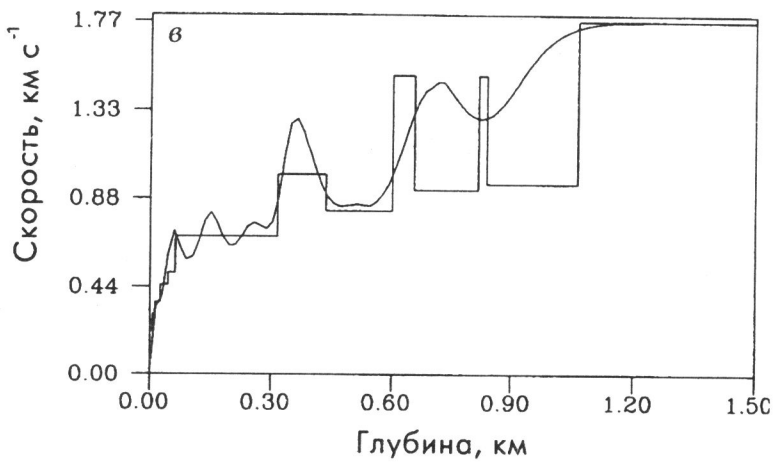
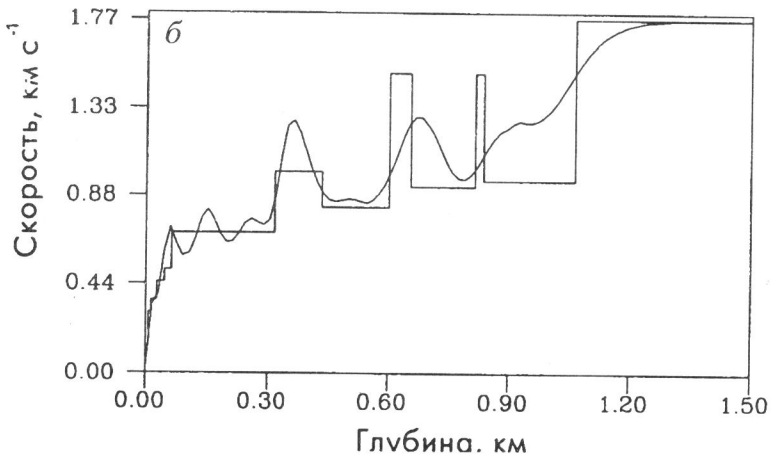
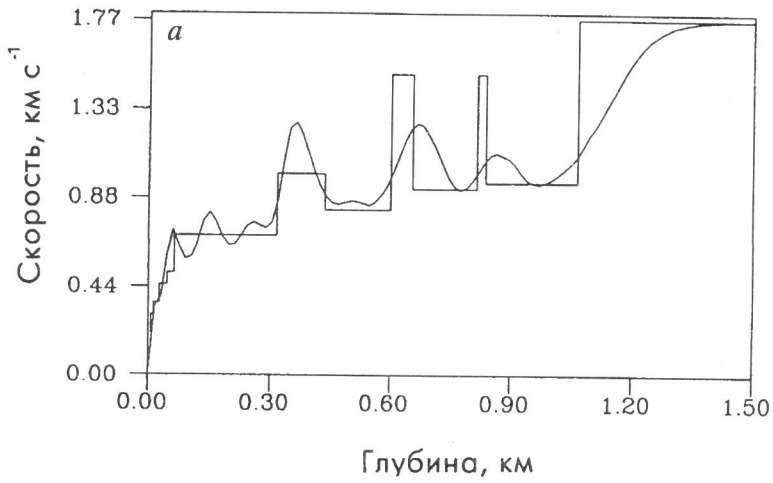
Номер моды	Волновое число	Амплитуда	Номер моды по возрастанию амплитуды	Номер моды	Волновое число	Амплитуда	Номер моды по возрастанию амплитуды
1	70.24998	44.6483	9	6	19.73301	0.01754	1
2	33.12432	1.92395	8	7	17.35293	0.05720	2
3	29.28853	1.46768	7	8	14.47385	0.61601	5
4	23.46205	0.16707	3	9	9.522277	0.23232	4
5	21.24691	1.14634	6				

с номером 3 – на рис. 1,г и д. Довольноводная часть разреза всюду хорошо восстанавливается только по сильным модам.

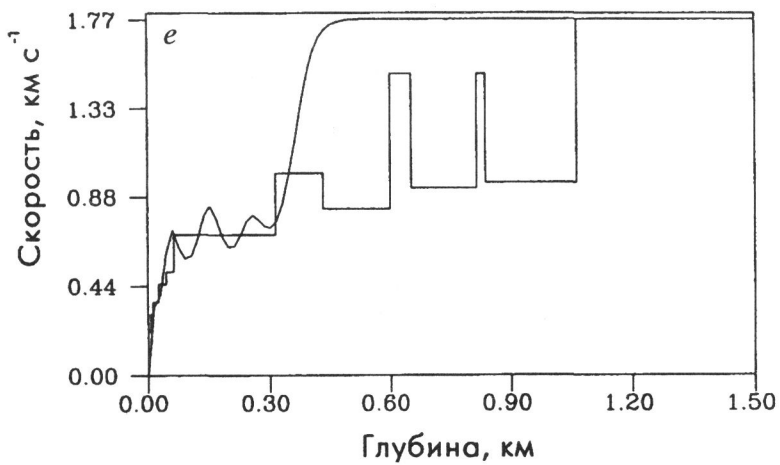
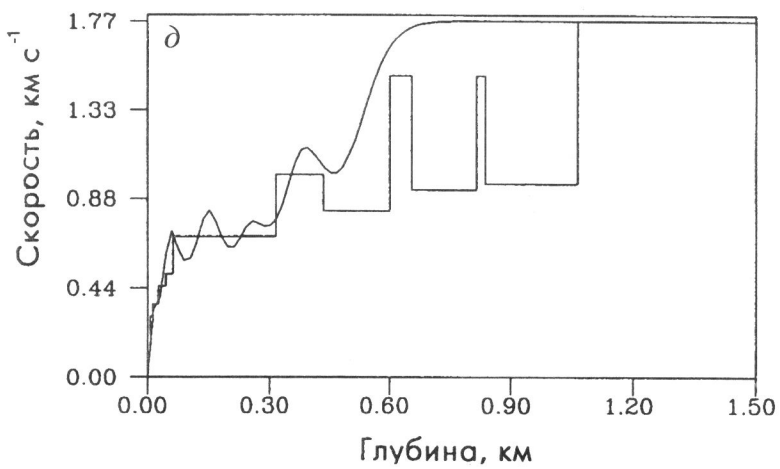
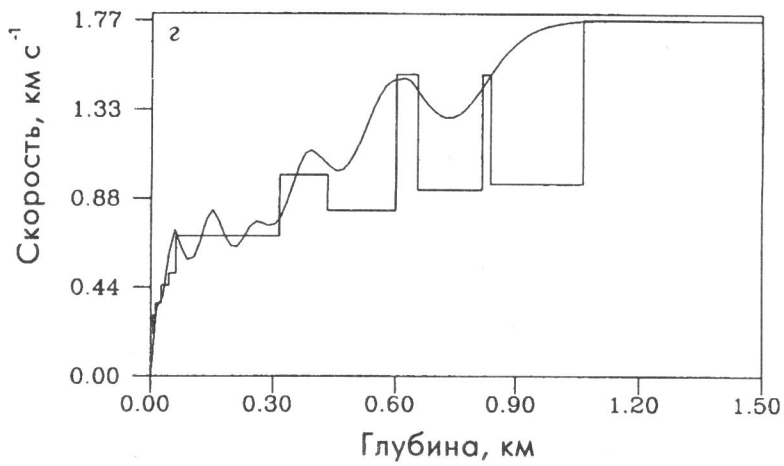
Серия графиков, соответствующая частоте зондирования 5 Гц (рис. 2) показывает, как ухудшается аккуратность восстановления разреза с уменьшением частоты зондирования. Одновременно уменьшается и контрастность мод (табл. 3), что упрощает их выделение. Отметим, что отбрасывание второй (рис. 2,в) и, особенно, третьей (рис. 2,г) слабейшей моды исказило и часть довольноводного разреза. Однако после исключения четвертой слабой моды (рис. 2,д) эта часть разреза снова восстанавливается сравнительно хорошо. Такое немонотонное ухудшение инверсии при последовательном исключении слабых мод мы видим впервые. Отбрасывание пятой слабейшей моды (рис. 2,е) почти не сказывается на инверсии.

Наконец, при частоте зондирования 4 Гц (рис. 3) амплитуды мод становятся сравнимыми (табл. 4). Это особенно заметно, если исключить из рассмотрения приповерхностную моду с наибольшей амплитудой и волновым числом. На практике эта мода, скорее всего, будет наблюдаться только вблизи источника из-за большого затухания в раздробленном приповерхностном слое. Затем она исчезнет, главную роль станут играть следующие за ней моды, энергия которых распространяется в более глубоких слоях с меньшим затуханием. Хотя инверсия на этой частоте значительно грубее, чем на 10 Гц, но решение обратной задачи монохроматического виброзондирования по-прежнему содержит сведения о скоростях в волноводах, которые невозможно извлечь из решения обратной кинематической задачи, т.е. из сейсмических годографов.

Мы надеемся, что монохроматическое зондирование сможет найти широкое применение в сейсмической разведке. Помимо непосредственного определения скоростных разрезов, инверсия данных монохроматического зондирования может использоваться для введения обоснованных ограничений на скорости в волноводах, что важно в тау-методе. Хотя при низкочастотном зондировании скорость находится неточно, она



Р и с. 3. Результат восстановления скорости SH-волн для частоты 4Гц
а — по всем модам, *б—с* — последовательное исключение слабой из оставшихся мод



может использоваться как эффективная скорость для суммирования в методе ОГТ, так как общий тренд скорости с глубиной в основном проявляется. Кроме того, различные частотно-амплитудные характеристики сухих и нефтесодержащих (а также газосодержащих) слоев могут при монохроматическом сигнале оказаться новым признаком месторождений нефти и газа.

В последние годы мы разрабатываем аналогичный метод для волн Рэлея, возбуждаемых вертикальным вибратором. С помощью этого метода по вертикальным монохроматическим вибрациям можно будет, помимо скоростных разрезов, находить также зависимость плотности от глубины.

ЛИТЕРАТУРА

1. 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. М.: Наука, 1991. (Вычисл. сейсмология, вып. 24). С. 171–185.
2. *Markushevich V.M.* The determination of elastic parameters of a half-space using a monochromatic vibration field at the surface // *Wave motion*, Iss. 9. Amsterdam: North-Holland. 1987. P. 37–49.