

УДК 534.2:550.34

ПРИМЕНЕНИЕ МОБИЛЬНОГО СЕЙСМОАКУСТИЧЕСКОГО КОМПЛЕКСА ДЛЯ ИЗУЧЕНИЯ ГЕОЛОГИЧЕСКОЙ СТРУКТУРЫ И ПОИСКА НЕОДНОРОДНОСТЕЙ НА ГЛУБИНАХ ДО 100 М

© 2001 г. В. С. Авербах, В. В. Артельный, Б. Н. Боголюбов, Д. В. Долинин, Ю. М. Заславский, А. П. Мартышев, Ю. К. Постоевко, В. И. Таланов

Институт прикладной физики РАН
603155 Н. Новгород, ул. Ульянова 46
E-mail: zaslav@hydro.appl.sci-nnov.ru

Поступила в редакцию 02.10.2000 г.

В статье представлены результаты практической апробации мобильного сейсмоакустического комплекса, предназначенного для поиска и визуализации подземных инженерных сооружений. Комплекс создан в ИПФ РАН и состоит из электродинамического излучателя сейсмоакустических волн, работающего в диапазоне 200–800 Гц, решетки приемников и системы управления на базе ЭВМ. Управление сигналом является цифровым и позволяет накапливать до 10^3 реализаций. Сигнал принимается на высокочувствительные сейсмодатчики, усиливается малошумящими усилителями, подается на 16-ти разрядное АЦП, после чего воспроизводится на экране ЭВМ. С помощью описываемого комплекса в ходе полевых экспериментов проведено успешное определение местоположения водоотводной противооползневой штольни.

В настоящей работе излагаются результаты натурных экспериментов, выполненных с целью апробации объемной визуализации искусственных подземных инженерных сооружений с помощью разработанного и изготовленного в ИПФ РАН в 1999 г. специализированного мобильного высокочастотного сейсмоакустического комплекса, предназначенного для активного зондирования толщи грунтов. Сейсмический мониторинг и визуализация неоднородностей в самой верхней части разреза земной среды являются весьма актуальной проблемой, решение которой последние двадцать лет пытаются осуществить с применением полей различной физической природы на основе использования разных подходов [1]. Наиболее остро проблема визуализации стоит для глубины грунтов от единиц до первых десятков метров. Здесь среда характеризуется сильной рыхлостью, непостоянством и даже резкой изменчивостью структуры. Эти факторы, а также высокое содержание почвенной влаги в этой области глубин вызывают наиболее неблагоприятные условия распространения из-за высоких показателей поглощения упругих сейсмоакустических полей. Поэтому при решении традиционных задач разведочной геофизике стремятся учесть наличие данной области путем введения в расчеты соответствующих поправок. На глубинах, превосходящих указанную зону, структура земной среды в направлении горизонтальных координат характеризуется существенно более слабой изменчивостью, в связи с чем разработанные в геофизике ме-

тоды и имеющиеся в практике средства, как правило, позволяют проследить только плавные отклонения в ее глубинном строении. Визуализация локальных неоднородностей, залегающих в верхней части разреза, выполняется пока в редких случаях путем применения традиционных методов наблюдения с использованием миниатюрных взрывных источников и многократно переставляемых по поверхности сейсмических кос. Многократная перестановка обеспечивает возможность некогерентного накопления сигналов при использовании взрывных источников.

В нашем случае зондирование расположенной в толще грунта водоотводной противооползневой штольни проведено с помощью специализированного мобильного высокочастотного сейсмического комплекса, обеспечивающего когерентное излучение сейсмоакустического поля "подсветки". Высокая стабильность генерируемого сейсмического поля дает возможность использовать все преимущества современных средств и методов обработки сигналов рассеянных неоднородностями. К числу наиболее эффективных следует отнести современный метод фокусировки полей, принимаемых на одномерную и двумерную антенную решетку, позволяющий с высоким разрешением визуализировать некоторый обследуемый объем земной среды, потенциально содержащий локальную неоднородность.

Натурный эксперимент проведен в районе береговой зоны Волжского откоса, на котором поверхность грунта идет под уклон (угол с горизон-

тов – 30°), а сам грунт имеет тенденцию к оползневым явлениям, в связи с чем на нижнем горизонте откоса в пределах зоны городской застройки вглубь земной среды уходят водосборные (дренажные) штольни. Длина штольни составляет несколько сот метров, а ее поперечное сечение имеет вид трапеции, чуть суженной вверху, полная высота – 1.8 м, ширина нижнего основания – 1.2 м, сама штольня изнутри выложена бетонными плитками. Таким образом, задача сейсмической визуализации штольни оказывается дополнительно усложненной характером геологического строения в зоне эксперимента. Следует отметить, что сейсмоакустический мониторинг территорий, содержащих оползнеопасные зоны, представляет собой сложную техническую проблему и попытки его осуществления с помощью импульсных методов зондирования предпринимались неоднократно [2–5].

Приемо-передающая часть комплекса установлена выше входа в штольню (см. схему эксперимента на рис. 1), глубина по вертикали от ближайшей точки линейной цепочки приемной антенны до уровня потолка штольни – 3.5 м. Антенная решетка представляет собой восьмиканальную цепочку геофонов-акселерометров, выход преусилителей каждого из которых соединяется с соответствующим входом восьмиканального АЦП. Приемная апертура синтезирована четырьмя последовательными перемещениями восьмиканальной антенны в продольном направлении, т.е. состоит из 32 измерительных точек. Реализация такой антенны из 32 точек измерений с шагом 0.5 м оказалась возможна только за счет высокой степени когерентности излучаемого источником поля. Восстановленная на наклонную земную поверхность проекция линии штольни приходится на геометрический центр – середину синтезируемой апертуры. Источником сигнала был вибратор с вертикальной поляризацией переменного силового воздействия, установленный на выровненной горизонтальной площадке (0.3 м × 0.3 м), удаленной на 1 м от линии приемной антенны и смещенной от центра апертуры влево на 2 м. Источник возбуждал сигналы сложной формы в полосе рабочих частот 100 Гц–1000 Гц с регулируемым усилием, максимальное значение которого – 250 Н.

Регистрирующая и управляющая источником аппаратура, соединяемая с приемниками и источником электрическими кабелями, установлена в кабине автомобиля, находящегося вблизи входа в штольню. Динамический диапазон регистрации, то есть перепад уровней от максимального сигнала, регистрируемого в линейном режиме, до уровня электронного шума, пересчитанного ко входу усилителей составлял 100 дБ. Регистрируемые сигналы заносились в память PC-Note Book (Pentium 150).

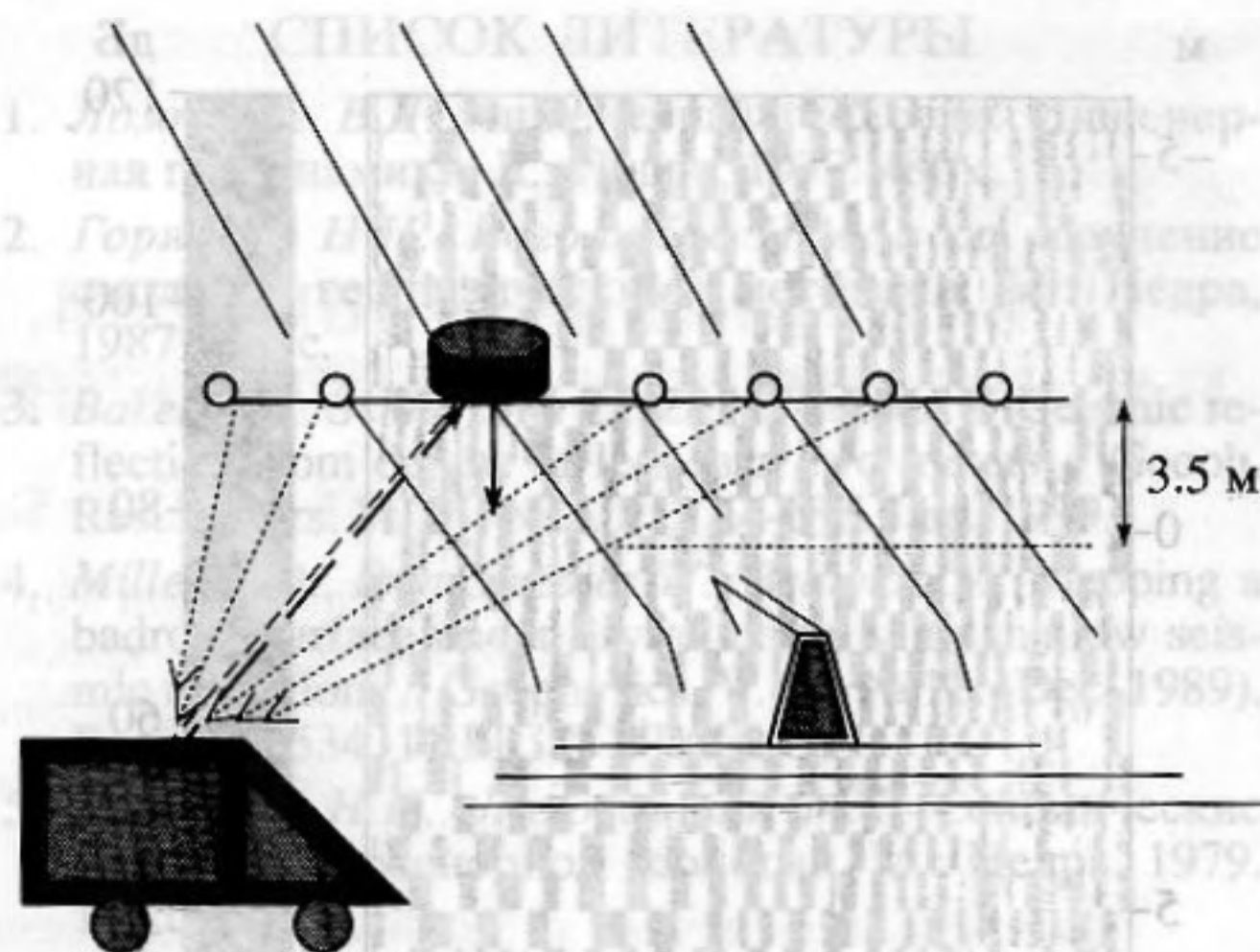


Рис. 1. Схема расположения приемо-излучающего комплекса при проведении экспериментов по сейсмоакустическому зондированию штольни в районе Волжского откоса.

Ниже рассмотрим только результаты зондирования тонально-импульсными сигналами, хотя аппаратура управления и электромеханическая конструкция позволяют излучать сигналы разного вида. В описываемом эксперименте в качестве задающих используются короткие цуги, состоящие из трех периодов несущей частоты 300 Гц, причем качество воспроизведения их механической конструкцией контролируется с помощью акселерометра, закрепленного вертикально на рабочей плите источника, находящейся в контакте с грунтом. Сигнал с этого датчика передавался по служебному каналу и также фиксировался в памяти компьютера.

Выполненным экспериментам предшествовали предварительные измерения, имеющие целью оценить величину ослабления полезного сигнала на пути первичного луча, чтобы определить необходимое усиление входного тракта. Эти измерения показали, что прямой луч на частотах порядка 300 Гц на дистанции в 4 м ослабляется по уровню на 50 дБ. Такой значительный спад уровня, вызванный высоким значением диссипативных потерь, свидетельствует о рыхлости грунта в оползневой зоне, что далее подтверждается низкими значениями скорости распространения соответствующих сейсмоакустических волн [2, 5].

На рис. 2 представлена общая картина волнового поля, зарегистрированного антенной решеткой. Эта картина указывает на присутствие слабо выделяемых на общем шумовом фоне осей синфазности, соответствующих вступлению на цепочку приемников некоторых регулярно возбуждаемых и бегущих по поверхности волн. Вначале – это волны, бегущие по воздуху (скорость 340 м/с) и регистрируемые ближайшими к источнику 4–5 геофо-

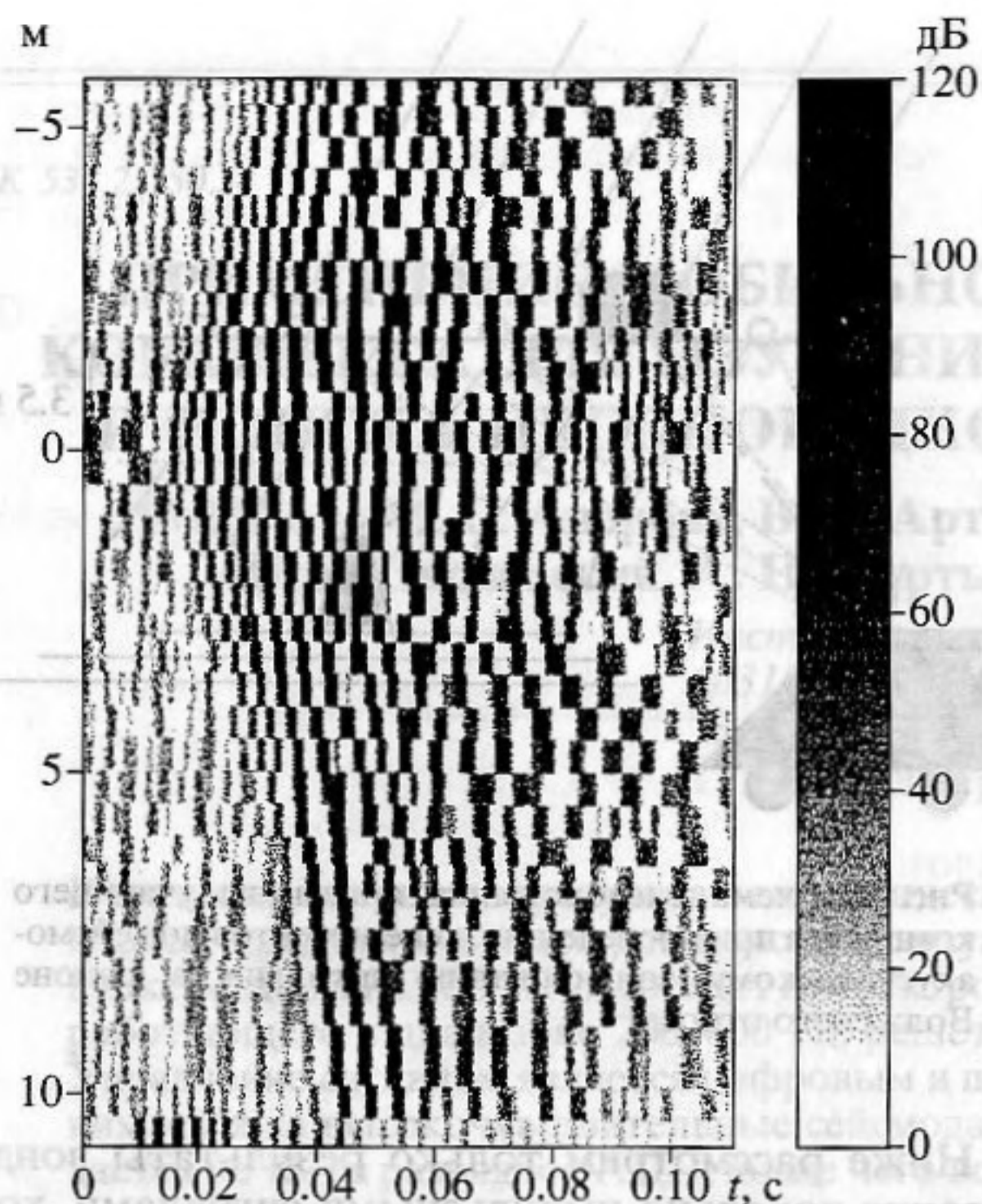


Рис. 2. Волновое поле, регистрируемое линейной антенной решеткой в области зондирования.

нами, а затем можно выделить еще две оси синфазности — это “чисто” сейсмические волны: рэлеевская волна (скорость 200 м/с) и преломленная какой-то более глубокой границей волна (скорость 500 м/с), которые регистрируются датчиками, расположенными в точках, удаленных от центра апертуры. В результате затухания уровень сигналов, принимаемых удаленными от середины антенны датчиками, оказывается существенно ниже, чем в центре. В итоге фактическое значение апертуры снижается до 16-ти метрового отрезка — по 8 м слева и справа от центра антенны. Следует

заметить, что неровности микропрофиля поверхности и изменчивость упругих параметров, т.е. флуктуации акустических характеристик земной среды от точки к точке вблизи поверхности, весьма значительны, ввиду чего из представленного на рис. 2 волнового поля, имеющего заметно хаотический вид, трудно выделить регулярные отличия в верхней и нижней его половинах, хотя заранее известно, что в области левого крыла антенны приемников (нижняя половина рисунка) присутствует искусственная неоднородность.

С использованием значения скорости распространения сигнала — 200 м/с — была выполнена процедура фокусировки на область среды под антенной на глубину порядка 20 м. Полученная картина представлена на рис. 3, на которых дается “изображение” участка разреза по глубине вблизи вертикального сечения штольни. На рис. 3а картина распределения неоднородности соответствует фокусировке тонально импульсных сигналов, имеющих полосу с центральной частотой — 300 Гц, на рис. 3б — с частотой 400 Гц, на рис. 3в представлен результат произведения фокусировок, полученных в двух предыдущих случаях. Последняя процедура позволяет обострить очертания неоднородности, хотя и после нее в пределах области фокусировки нетрудно видеть кроме основного пятна на месте расположения штольни побочные пятна, возникающие в результате интерференции волновых полей, падающих и рассеянных на препятствии.

Таким образом, на основе проведенных экспериментов по сейсмическому зондированию с помощью мобильного приемо-передающего комплекса может быть сделан вывод о практической реализуемости визуализации локальных неоднородностей на высоких частотах сейсморазведочного диапазона. Построенный комплекс обеспечивает все этапы зондирования, включая программно-алго-

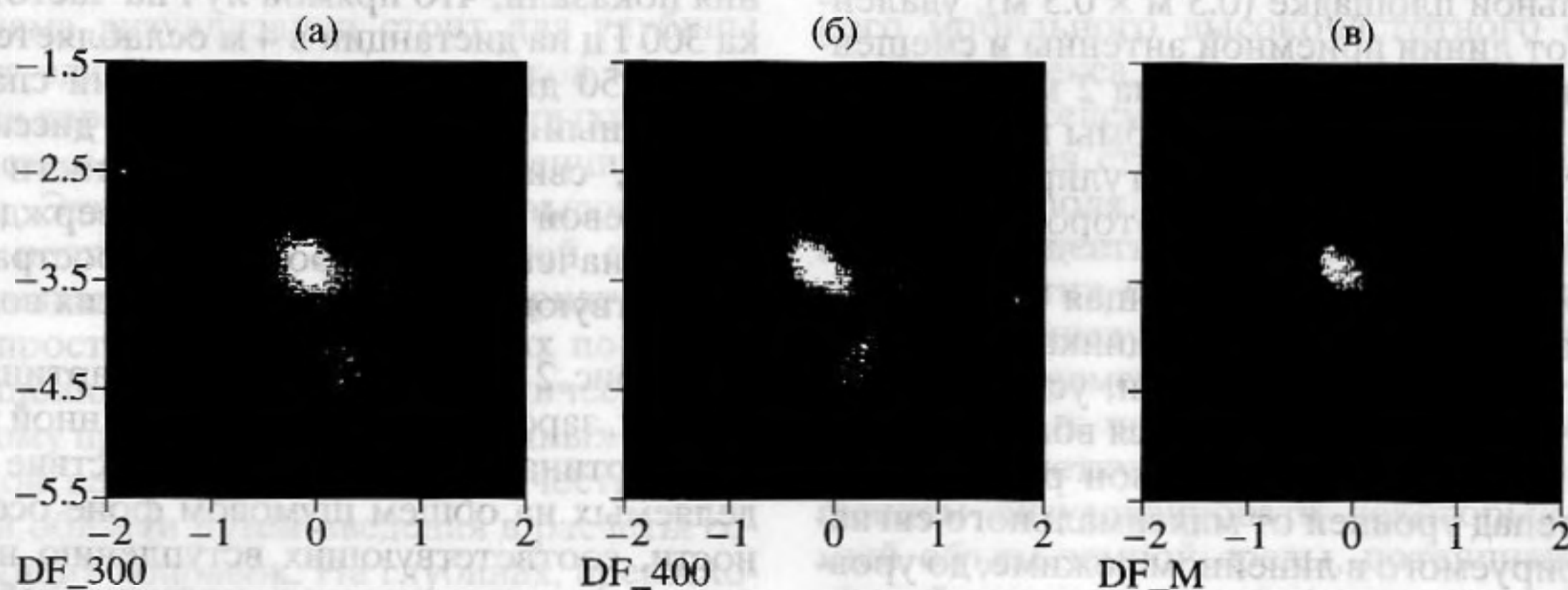


Рис. 3. Картина распределения неоднородности (вертикальный разрез), полученная методом фокусировки на область, занятой штольней: а — на частоте 300 Гц, б — на частоте 400 Гц, в — результат произведения фокусировок предыдущих двух случаев.

ритмические процедуры обработки регистрируемого сигнала и представления результатов в виде картины распределения яркости, соответствующей характеру пространственного распределения физических параметров земной среды. На перспективу разработан план доработки и модернизации комплекса, что позволит в дальнейшем повысить эффективность его применения.

Работа выполнена при поддержке Министерства науки и технологий Российской Федерации (Контракт № 4 от 14 марта 1997) и РФФИ (грант поддержки ведущих научных школ № 96-15-96592, грант № 99-02-16957) и Программы "Интеграция".

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Ломтадзе В.Д. Инженерная геология. Инженерная геодинамика. Л.: Недра, 1977. 480 с.
2. Горяинов Н.Н., Боголюбов Н.М. и др. Изучение оползней геофизическими методами. М.: Недра, 1987. 157 с.
3. Baker G.S., Schmeisner C., Don Steeples W. Seismic reflection from depths of less than two meters // Geoph. Res. Letters. V. 26. № 2. P. 279-283. Jan., 1999.
4. Miller R.D., Don Steeples W., Brannan M. Mapping a badrock surface under dry alluvium with shallow seismic reflections // Geophysics. V. 54. № 12. (Dec. 1989). P. 1528-1534. 10 FIGS. 1 TABLE.
5. Горяинов Н.Н., Ляховицкий Ф.М. Сейсмические методы в инженерной геологии. М.: Недра, 1979. 142 с.

Application of a Mobile Seismoacoustic System for Studying Geological Structure and Prospecting for Inhomogenities to a Depth of 100 m

V. S. Averbakh, V. V. Artel'nyi, B. N. Bogolyubov, D. V. Dolinin, Yu. M. Zaslavskii, A. P. Martyshev, Yu. K. Postoenko, and V. I. Talanov

The results of a practical evaluation of a mobile seismoacoustic system intended for the search for underground engineering structures and their imaging are presented. The system is designed at the Institute of Applied Physics of the Russian Academy of Sciences and consists of an electrodynamic radiator of seismoacoustic waves that operates in the frequency range 200-800 Hz, an array of receivers, and a computer-based control unit. The signal is controlled digitally, which allows the system to store up to 10³ realizations. The signal is received by high-sensitivity seismic sensors, amplified by low-noise amplifiers, supplied to a 16-channel A/D converter, and displayed on the computer monitor. The system was used in a field experiment to determine the location of an antilandslide drainage adit.