

УДК 550.834

**РАЗРАБОТКА И ИССЛЕДОВАНИЕ АВТОНОМНОГО МОБИЛЬНОГО  
КОМПРЕССИОННО-ВАКУУМНОГО УДАРНОГО ИСТОЧНИКА  
ПРОДОЛЬНЫХ ВОЛН ДЛЯ СЕЙСМОРАЗВЕДКИ**

**А. А. Репин<sup>1</sup>, А. К. Ткачук<sup>1</sup>, В. Н. Карпов<sup>1</sup>, В. Н. Белобородов<sup>1</sup>,  
А. Г. Ярославцев<sup>2</sup>, А. А. Жикин<sup>2</sup>**

<sup>1</sup>*Институт горного дела им. Н. А. Чинакала СО РАН, E-mail: repin@misd.nsc.ru,  
Красный проспект, 54, 630091, г. Новосибирск, Россия*

<sup>2</sup>*Горный институт УрО РАН, E-mail: asa\_gis@mi-perm.ru,  
ул. Сибирская, 78а, 614007, г. Пермь, Россия*

Рассмотрен опыт создания мобильной малогабаритной компрессионно-вакуумной ударной машины для малоглубинной до 100–150 м сейсморазведки. Показано, что для задач, решаемых малоглубинной сейсморазведкой, предпочтительными являются ударные источники колебаний. Представлены результаты лабораторных и экспедиционных исследований. Обоснованы пути дальнейшего развития машин данного класса.

*Источник упругих колебаний, малоглубинная сейсморазведка, ударная машина*

За последние годы в ИГД СО РАН получен ряд важных научных результатов, использованных в инновационных технических разработках. Один из примеров таких результатов — компрессионно-вакуумный источник упругих колебаний (КВУМ) для малоглубинной (до 100–150 м) сейсморазведки.

Для глубин в интервале 100–150 м источники упругих колебаний можно разделить на две группы [1]: поверхностные и заглубленные. Первая группа включает кувалду, падающий груз, сейсморужье [2]. Во второй выделяются взрывные (детонатор, малые заряды, газовая камера) и невзрывные (электроискровой спаркер, ударные, вибрационные) типы источников упругих колебаний. Сопоставление данных источников [3, 4] однозначно указывает на преимущество тех, которые основаны на взрыве малых зарядов в скважинах. Однако, учитывая экономические и экологические последствия такого способа возбуждения упругих колебаний, его применение в пределах градопромышленных агломераций практически исключено.

Для задач, решаемых высокоразрешающей малоглубинной сейсморазведкой, предпочтительными являются ударные источники колебаний [5]. Возбуждение сейсмических волн ими производится приложением к поверхности грунта кратковременных силовых воздействий (ударов). К таким источникам предъявляются следующие требования [5, 6]: легкость и компактность; возможность эксплуатации в стесненных условиях и на пересеченной местности; автономность; экологическая безопасность; низкая отдача; отсутствие повторного удара в результате отскока ударника. Необходимо отметить, что для указанного интервала глубин ручные механические источники ударного типа, такие как кувалда и гравитационный копер, широко применяются в малоглубинной сейсморазведке до сих пор. Их недостатки — использование ручного труда и сложность исключения повторных ударов.

Поэтому создание новых и совершенствование существующих невзрывных источников сейсмических волн для наземной сейсморазведки представляет актуальную научно-техническую задачу [7].

#### РАЗРАБОТКА И ЛАБОРАТОРНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ КВУМ

В 2006 г. на территории экспериментальной базы ИГД СО РАН “Зеленая горка” проведены первые экспериментальные работы по оценке возможностей применения машин ударного действия (пневмоударного молота “Тайфун-70”) в качестве источников упругих волн для малоглубинных сейсморазведочных исследований. По их результатам сделаны выводы о том, что структура волновой картины, регистрируемой импульсной машиной, ее частотный состав и ширина спектра близки к аналогичным параметрам, получаемым при малоглубинных сейсморазведочных исследованиях при использовании механических источников ударного типа со свободным падением ударника. Амплитуда сейсмических колебаний, возбуждаемых импульсной машиной, обеспечивает их устойчивую регистрацию в заданном интервале удалений. Использование импульсных машин для возбуждения упругих волн при малоглубинных сейсморазведочных исследованиях признано целесообразным, но для их адаптации процессу возбуждения и обеспечения технической возможности реализации необходимы определенные конструкторские решения. Основные требования, предъявляемые к таким источникам, — периодичность нанесения ударов; возможность регулирования периода между ударами; постоянство энергии единичного удара.

В соответствии с этим предложен вариант импульсного возбудителя сейсмических колебаний в виде переносной копровой установки компрессионно-вакуумного типа. Учитывая изложенные требования, а также с целью снижения металлоемкости конструкции и массы КВУМ в ее конструкции корпус машины выполнен в виде направляющей трубы из полимерных материалов (ПВХ). Это существенно снизило массу всей установки. В качестве энергоисточника использована ранцевая воздуходувка Oleo-Mac162, позволившая отказаться от передвижного компрессора и обеспечить мобильность на пересеченной местности и в стесненных условиях. Конструктивная схема компрессионно-вакуумной ударной машины приведена на рис. 1, а принцип ее работы подробно изложен в [8].

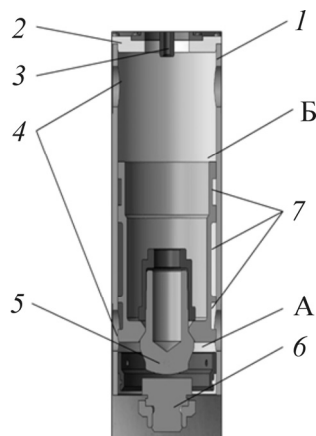


Рис. 1. Ударный узел сейсмоисточника: 1 — корпус; 2 — крышка корпуса с герметическим уплотнителем; 3 — канал для монтажа электромагнитного фиксатора; 4 — отверстия для монтажа двухлинейного воздухораспределительного устройства; 5 — составной поршень-ударник; 6 — наковальня; 7 — проточки под уплотнительные элементы; А — камера холостого хода; Б — камера рабочего хода

В процессе разработки особо острой проблемой стал выбор типов уплотнений поршня-ударника [9]. Требования к уплотнениям противоречивы. С одной стороны, ударник, движущийся в компрессионно-вакуумной машине, должен набирать максимальную скорость для получения необходимой энергии единичного удара, что подразумевает малое трение. С другой стороны, утечки, возникающие на обратном ходу, должны быть минимальными для возможности применения воздухоудвки в качестве привода. Очевидно, что большие утечки, так же как и трение, приводят к снижению энергетических показателей машины.

Для выбора уплотнения поршня-ударника с наименьшей силой трения и минимальной утечкой воздуха в лабораторных условиях проведены экспериментальные исследования с разными типами уплотнений (рис. 2). Для оценки сил трения и скорости ударника при разгоне использован способ видеофиксации (скоростной покадровой съемки с последующей обработкой данных) [10]. Результаты экспериментов приведены в таблице и на рис. 3. Они свидетельствуют о том, что пористо-волокнистое уплотнение обеспечивает энергию единичного удара больше на 15–20 % (при меньшей практически в 2 раза силе трения) по сравнению с уплотнениями из пластиковых колец.

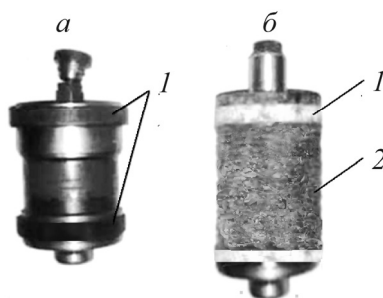


Рис. 2. Ударник массой 8.4 кг (а): 1 — пластиковые кольца; ударник массой 9.4 кг (б): 1 — полиуретан; 2 — войлок

Результаты экспериментов по определению сил трения при различных типах уплотнений и смазочных материалов

Тип уплотнения	Номер эксперимента	Смазка	Предударная скорость, м/с	Сила трения, Н
Пластиковые кольца	1	Отсутствует	3.3	26.3
Пластиковые кольца	2	М8-В	3.6	20.6
Пористо-волокнистое	3	Пенообразующий раствор (98 % воды)	4.2	12.0

С целью еще большего повышения энергии единичного удара без увеличения мощности воздухоудвки выполнены эксперименты с дополнительным ресивером, присоединенным к верхнему модулю камеры прямого хода, объем которого сопоставим с ее объемом (20 л). В результате проведенных экспериментов получены зависимости предударной скорости ударников для разных видов уплотнений (рис. 4). Повышение энергии единичного удара для каждого случая составило до 20 %.

Определенные проблемы при проведении работ создает отскок поршня-ударника и его последующий удар по наковальне. Данный эффект усложняет регистрацию продольных волн, поскольку чувствительные датчики фиксируют и это слабое воздействие. Для устранения повторного удара предложен режим “подхвата” поршня-ударника в момент отскока и проведена

серия экспериментов с регистрацией сигнала на малом (~0.4 м) расстоянии от точки приложения сейсмического импульса. Опыты осуществлялись на асфальте, так как на нем хорошо регистрируются эффекты “отскока” и его отсутствие. Для регистрации импульса использовались серийные сейсмодатчики и АЦП с ноутбуком.

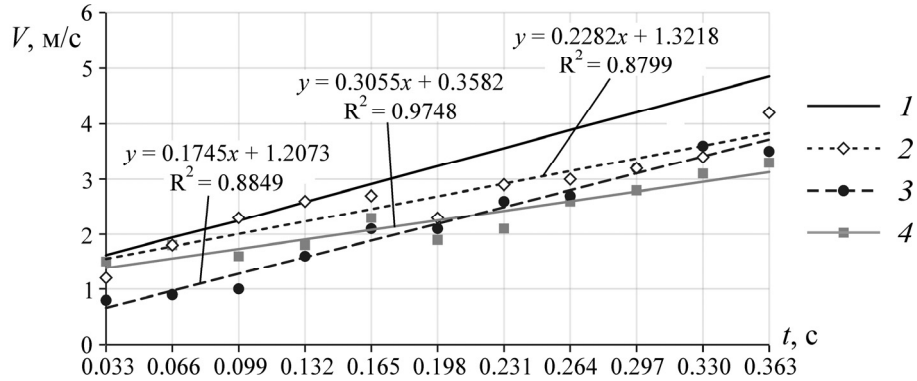


Рис. 3. Зависимость скорости ударника от времени перемещения в КВУМ: 1 — свободное падение ударника (теория); 2 — разгон ударника с пористо-волоконистым уплотнением, пропитанным пенным реагентом; 3 — ударник с пластиковыми кольцами и масляной смазкой; 4 — ударник с пластиковыми кольцами без смазки

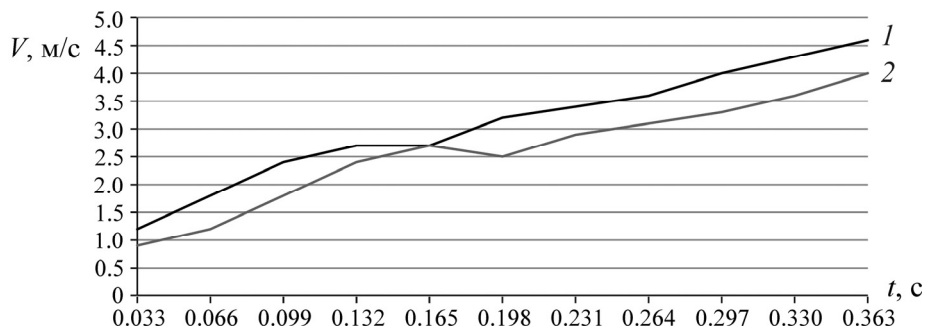


Рис. 4. Зависимость скорости ударника от времени перемещения при использовании дополнительного резивера: 1 — пористо-волоконистое уплотнение; 2 — пластиковые кольца

На рис. 5 показаны зарегистрированные режимы “с отскоком” и без него. В случае одиночного удара по стальной плите (рис. 5а) заметен эффект “отскока” с повторным ударом примерно через 0.1 с. На осциллограммах режима автоматической работы ударного сейсмоисточника в многоударном режиме (рис. 5б) видно, что эффект повторного удара вследствие “подхвата” исчезает.

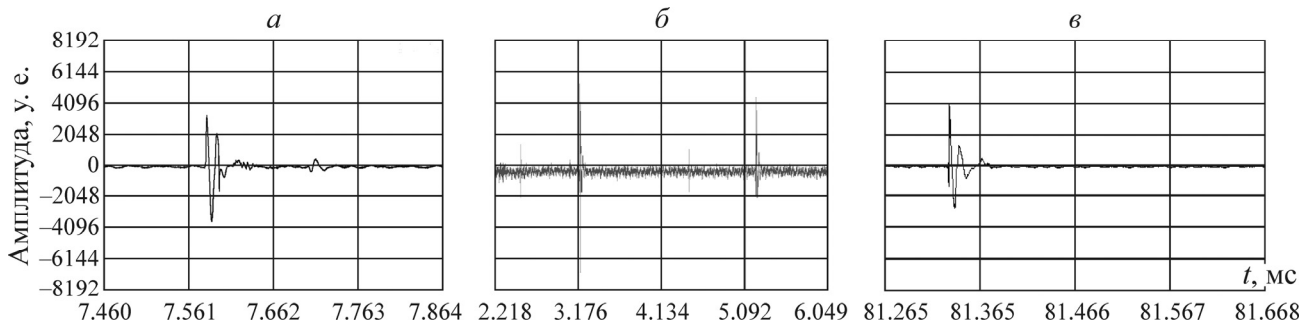


Рис. 5. Режимы работы сейсмоисточника: а — режим “с отскоком”; б — многоударный режим с “подхватом” бойка после удара; в — режим “без отскока”

### ИСПЫТАНИЯ КВУМ В НАТУРНЫХ УСЛОВИЯХ

В июне в 2014 г. на базе производственного участка Горного института УрО РАН в Перми выполнены опытно-промышленные испытания мобильного сейсмоисточника КВУМ. Испытания проводились с целью получения данных по характеристикам возбуждаемых колебаний, глубине воздействия на массив, определению параметров регистрируемых сейсмических сигналов и оценке работоспособности машины в реальных полевых условиях.

Экспедиционный комплект оборудования (рис. 6) включал в себя источники продольных волн — КВУМ и измерительную аппаратуру: телеметрическую сейморазведочную станцию IS-128 (Латвия – Россия) и сейсмоприемники GS-20DX (США).

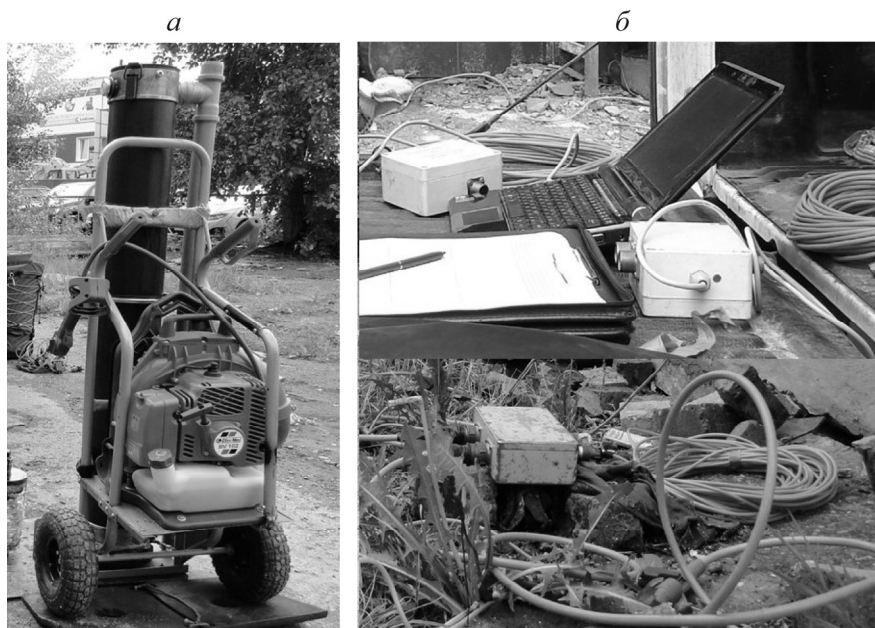


Рис. 6. Экспедиционный комплект оборудования: *а* — источник продольных волн — КВУМ; *б* — сейморазведочная станция IS-128

#### Комплектующие КВУМ:

- 1) ранцевая воздуходувка Oleo-MacBV162 — 1 шт. (мощность 3.5 кВт, расход воздуха 1200 м<sup>3</sup>/ч, частота вращения 7400 ± 200 об/мин, масса 9.4 кг);
- 2) корпус — 1 шт. (диаметр 160 мм, длина 1.4 м, масса 5.5 кг);
- 3) ударники — 2 шт. (масса 8.4 и 9.4 кг, материал — сталь 40Х);
- 4) тип уплотнения ударника (пластиковые разрезные кольца, пористо-волокнистое);
- 5) верхний модуль камеры рабочего хода — 1 шт. (фиксатор на базе мощных постоянных магнитов с использованием редкоземельных материалов);
- 6) транспортирующее устройство (тележка) — 1 шт. грузоподъемностью 150 кг;
- 7) воздухораспределитель — 2 шт. (поворотный, линейный).

#### Технические характеристики КВУМ:

- рабочее давление — 0.01 МПа;
- энергия удара — до 200 Дж;
- время подъема ударника — 2–4 с;
- размеры 1450×650×600 мм;
- масса, кг: с транспортирующим устройством — 44.5, переносной вариант — 26.

В ходе исследований выполнено 200 сейсмических возбуждений на 10 точках с регистрацией 20 отдельных сейсмограмм. С целью оценки энергии и амплитуды возбуждаемых колебаний сейсмограммы записаны с разным количеством накапливаний на отдельных пунктах возбуждения. На этих же точках проводились возбуждения ударным источником — кувалдой (6 кг).

Волновое поле от КВУМ содержит все основные типы и классы полезных волн. Уровень зарегистрированных сигналов при единичном воздействии (рис. 7), позволяет сравнивать энергетические характеристики удара кувалдой и КВУМ. Преобладающей интенсивностью в обоих случаях характеризуются поверхностные и преломленные волны.

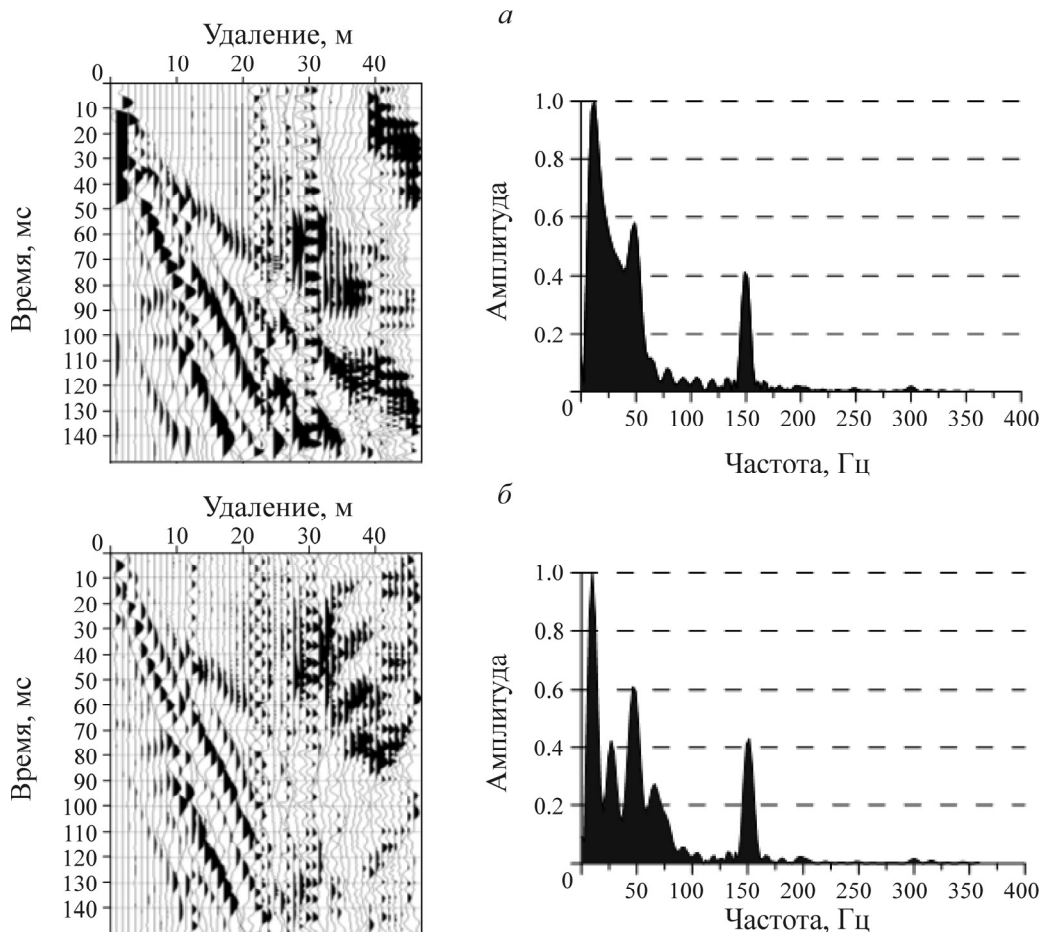


Рис. 7. Сейсмограммы и спектральные характеристики сигналов при единичном ударе кувалдой (а) и КВУМ (б)

На сейсмограммах от кувалды и КВУМ (рис. 8) полезные колебания прослеживаются до одноименных времен — 150 мс и далее. Установлено, что при скоростях распространения продольных волн в исследуемых грунтах порядка 1000 м/с в простых поверхностных условиях (поле, грунтовая дорога, газоны, тротуары) источник пригоден для изучения глубин 70–100 м.

Исходя из динамических и кинематических характеристик упругих колебаний, зарегистрированных от КВУМ, итоговая вертикальная разрешающая способность сейсмического метода достигает 0.8–1.2 м. Данные оценки позволяют утверждать, что по аналогии с известными типами источников сейморазведочные исследования с использованием КВУМ могут быть успешно применены при решении широкого круга инженерных задач — от изучения карстово-суффозионных процессов и поиска археологических артефактов до изучения причин деформации зданий, дамб и горнотехнических сооружений.

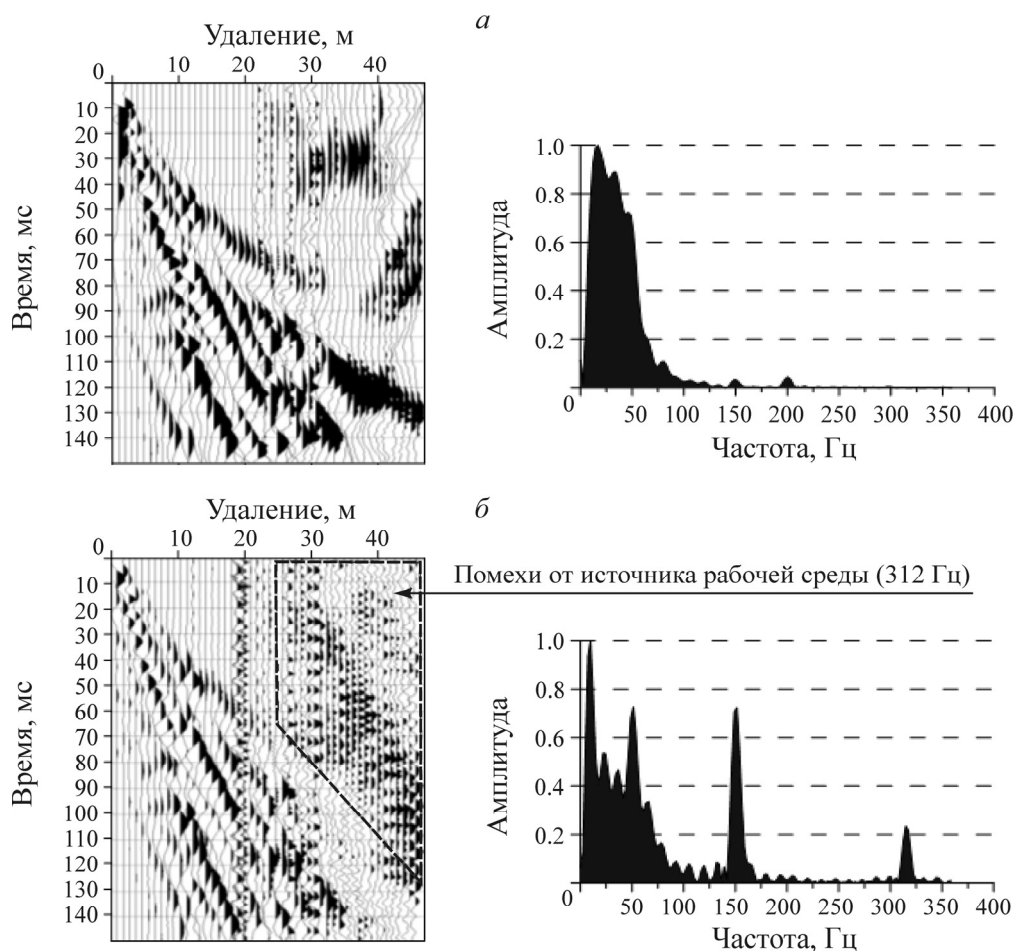


Рис. 8. Сейсмограммы и спектральные характеристики сигналов при групповом ударе кувалдой (а) и КВУМ (б)

Результаты лабораторных и натурных испытаний позволяют утверждать, что для совершенствования компрессионно-вакуумных машин необходимо использовать направляющие с эллипсностью, не превышающей значение 1.2 мм, из материалов с шероховатостью меньше, чем у стальных конструкций, а также уплотнительных соединений в трущейся паре ударник – корпус из композитных материалов (полимерных и графитовых смазок), способствующих увеличению энергии единичного удара и снижению утечек, позволяющих задавать оптимальные режимы работы воздухоудовки, снижая шумовые характеристики машины; устанавливать съемные шумопоглотители (глушители) при работе в городской черте; применять пневмоприводы на базе бензовоздуходувки в ранцевом исполнении, снижающих негативное вибровоздействие на грунт и повышающих отношение сигнал – помеха на сейсмических записях; автоматизировать управление КВУМ в автоколебательном режиме; снижать массу путем размещения компактного компрессионно-вакуумного источника рабочей среды (воздуха) внутри корпуса машины; использовать легкие ресиверы для повышения энергии единичного удара; применять универсальные модульные комплекты машины, обеспечивающие смену энергоисточника в зависимости от условий проведения сейсморазведки.

#### ВЫВОДЫ

Обоснована конструктивная схема импульсного устройства с компрессионно-вакуумным рабочим циклом и создан опытный образец сейсмоисточника для малоглубинных геофизических исследований.

Проведены экспериментальные исследования, позволившие установить зависимость скорости и энергии удара от типа используемого уплотнения, что дает возможность увеличить энергию единичного удара на 15–20 % при меньшей в 2 раза силе трения по сравнению с уплотнениями из пластиковых колец.

Проведена серия производственных испытаний на территории Пермского края, которые показали, что КВУМ обеспечивает проведение сейсморазведочных работ в стесненных условиях и на пересеченной местности, а его энергии достаточно для построения геологического разреза в интервале глубин 70–100 м, а в ближайшей перспективе — 250 м.

При благоприятных поверхностных условиях сейсмоисточник на базе КВУМ может регистрировать колебания в частотном диапазоне до 300 Гц, что говорит о его достаточной эффективности при решении широкого круга задач, стоящих перед инженерной сейсморазведкой.

Предварительные оценки трудозатрат и оперативность отработки одной физической точки показывают достаточную экономическую эффективность перехода от традиционных источников колебаний к источникам на базе КВУМ.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Детков В. А.** Возбуждение сейсмических волн импульсными невзрывными источниками // Journal of Siberian Federal University. Mathematics & Physics, 2009, 2(3).
2. **Теория** и практика наземной невзрывной сейсморазведки / под ред. М. Б. Шнеерсона. — М: Недра, 1988.
3. **Чичинин И. С.** Вибрационное излучение сейсмических волн. — М.: Недра, 1984.
4. **Hill I. A.** Field techniques and instrumentation in shallow seismic reflection, Quarterly Journal Engineering Geology, 1992, No. 25.
5. **Белобородов В. Н., Репин А. А., Ткачук А. К.** Разработка длинноходовой компрессионно-вакуумной ударной машины // Фундаментальные проблемы формирования техногенной геосреды. — Т. III. Машиноведение. — Новосибирск: ИГД СО РАН, 2010.
6. **Санфиоров И. А., Ярославцев А. Г., Фатькин К. Б., Прийма Г. Ю., Бабкин А. И.** Сейсморазведочные исследования условий разработки калийной залежи // Геофизика. — 2011. — № 5.
7. **Санфиоров И. А., Байбакова Т. В., Бабкин А. И.** Параметрическое обеспечение шахтной многоволновой сейсмоакустики // Разведка и охрана недр. — 2008. — № 12.
8. **Санфиоров И. А.** Рудничные задачи сейсморазведки МОГТ. — Екатеринбург: УрО РАН, 1996.
9. **Пат. на ПМ № 147963 РФ.** Компрессионно-вакуумная машина ударного действия (варианты) / В. Н. Белобородов, А. К. Ткачук, В. Н. Карпов // Оpubл. в БИ. — 2014. — № 32.
10. **Белобородов В. Н., Ткачук А. К.** Способ экспериментального определения динамических параметров машин ударного действия // Фундаментальные проблемы формирования техногенной геосреды — Т. II. Машиноведение. — Новосибирск: ИГД СО РАН, 2012.

*Поступила в редакцию 11/XI 2015*