

Базовые характеристики сейсмического канала для регистрации слабых сигналов (на примере автономной станции РОСА-А)

Сагайдачная О.М., Сальников А.С., Вершинин А.В., Сагайдачный А.В., Шмыков А.Н., ФГУП СНИИГИМС, г. Новосибирск

Аннотация

Формирование волнового сейсмического поля является сложным процессом, зависящим от ряда физических явлений, из которых важнейшие - отражение, преломление, поглощение, излучение, рассеяние упругих колебаний, а также слабо выраженные нелинейные трансформации сейсмической энергии. Изучение этих явлений, находящихся в сложной взаимозависимости, требует пространственно распределенных многократных систем наблюдения, высокоточного измерительного канала и широкого частотного диапазона (практически от 0 до 1000 Гц и выше) регистрации упругих колебаний.

В настоящее время актуален вопрос о регистрации слабых сигналов точечной группой приёмов в бескабельных системах сбора сейсмических данных.

Приведены данные регистрации слабых сигналов точечной группой геофонов с использованием автономных станций РОСА-А (Россия) при глубинных исследованиях на удалениях до 300 км и при выполнении инженерно-геологических работ в угольных шахтах.

Введение

Формирование волнового сейсмического поля является сложным процессом, зависящим от ряда физических явлений, важнейшими из которых являются - отражение, преломление, поглощение, излучение, рассеяние упругих колебаний, а также слабо выраженные нелинейные трансформации сейсмической энергии. Изучение этих явлений, находящихся в сложной взаимозависимости, требует пространственно распределенных систем наблюдения, высоко-точного измерительного канала и широкого частотного диапазона регистрации упругих колебаний (практически от 0 до 1000 Гц и возможно выше).

В настоящее время активно развивается полевая технология сейсмических работ с использованием бескабельной системы сбора данных на базе автономных модулей регистрации, в которой последние работают соответственно требованию «установи (поставь) и забудь» [3, 4, 7-12]. Очевидным преимуществом бескабельной системы является отсутствие внешнего кабеля для подачи электропитания и связи с управляющей станцией, а также проводов между блоками регистрации сейсмических данных. Сейсмические линии связи составляют значительную часть от общего веса полевого оборудования, являются одной из главных причин снижения производительности труда, часто повреждаются и требуют достаточно дорогостоящего технического обслуживания.

Однако в сложных сейсмогеологических условиях для проведения геофизических исследований особо значима открытость и масштабируемость в пространстве бескабельной системы сбора и регистрации сейсмических данных на базе автономных модулей записи. Возможность использования практически неограниченного количества автономных модулей регистрации, распределенных с переменной плотностью по площади исследования, обеспечивает проведение сейсмических работ одновременно на нескольких базах наблюдения, в том числе с локальным увеличением плотности пунктов приёма на отдельных, определенных целевой задачей, объектах, например, около сква-

жины.

С этих позиций интересно подробнее проанализировать проблему регистрации слабых сейсмических сигналов автономными станциями, в том числе с использованием точечной группы сейсμοприемников.

Основные характеристики цифрового сейсмического канала регистрации

К основным характеристикам цифрового канала регистрации сейсмических сигналов следует отнести следующие:

- частотный диапазон (Гц) регистрации;
- максимальный по амплитуде входной сигнал (под уровнем максимального входного сигнала считается напряжение (В) ограничения сейсмического канала);
- действующее значение аппаратного шума ($\mu\text{В}$), приведенного ко входу усилителя, которое определяет минимальный уровень регистрации сейсмических сигналов и рассчитывается через значение среднеквадратического отклонения случайного процесса, зарегистрированного каналом, шунтированным на входе эквивалентом датчика, отнесенное к коэффициенту усиления канала;
- мгновенный динамический диапазон (мДД), который определяется как производная через отношение максимального действующего напряжения к собственным шумам;
- коэффициент нелинейных искажений канала регистрации, который вычисляется как отношение энергии суммы кратных первой гармоники к энергии первой гармоники сигнала;
- коэффициент подавления синфазной помехи.

Проблема с нелинейными искажениями сигнала при регистрации сегодня практически снята, поскольку в современных сейсмических станциях уровень нелинейных искажений цифрового канала регистрации на несколько порядков ниже уровня собственных нелинейных искажений канала преобразования геофона. Так, например, лучшие геофоны SS-10PD фирмы «Senshe Tech» имеют коэффициент нелинейных искажений 0,1%, у пьезодатчиков А0514 (ЗАО «Электронные технологии и метрологические системы», г. Зеленоград, Московская обл.) этот параметр соответствует 0,05%, а коэффициент нелинейных искажений сейсмического канала регистрации телеметрических станций не превышает 0,0005%, что в 200 раз меньше.

Синфазная помеха может оказывать значительное влияние на общий уровень шумов канала регистрации, но применяемые в настоящее время усилители по подавлению синфазной помехи являются высококачественными и за счет использования резисторов класса точности 0,1% обеспечивают подавление синфазной помехи на уровне - 110 дБ.

Базовым параметром, ограничивающим минимальный уровень регистрируемых сигналов, является величина мгновенного динамического диапазона (мДД) сейсмического канала. Как правило, регистрация полноформатных данных (мДД превышает 120 дБ) обеспечивает достоверное выделение информативной составляющей в общем потоке информации и, следовательно, возможность исследования энергетически слабо выраженных отдельных элементов сейсмического поля [2].

Для достижения требуемого значения мДД

ПОЛЕВЫЕ СЕЙСМОРАЗВЕДОЧНЫЕ КОМПЛЕКСЫ
ПРИБОРЫ И СИСТЕМЫ

цифрового канала регистрации предпочтительно применять дельта-сигма модулятор высокого порядка. Обеспечение высокого уровня МДД цифрового канала регистрации сейсмических данных предполагает снижение эффекта наложения спектров, обусловленного дискретизацией сигнала. Для подавления помех наложения используется антиалиасинговый фильтр, требование к которому тем ниже, чем выше отношение F_{mod}/F_d , где F_{mod} – частота тактирования дельта-сигма модуляторов; F_d – частота квантования цифрового потока на выходе аналого-цифрового преобразователя (АЦП).

Цифровые фильтры современных микросхем построены, как правило, по принципу каскадной фильтрации с последующим прореживанием данных. Аналоговый антиалиасинговый фильтр должен уменьшить все гармоники выше половины частоты прореживания до уровня менее – 120 дБ, в противном случае произойдет их перенос в полосу пропускания. Реально в качестве антиалиасингового фильтра используется RC фильтр на входе с частотой среза 40 кГц (400 Ом и 10 нФ) и последующий фильтр с частотой среза 27 кГц (600 Ом и 10 нФ) для ADS1282). Ни один из производителей микросхем не приводит амплитудно-частотную характеристику (АЧХ) сквозного канала регистрации в диапазоне от нуля до значения F_{mod} . Параметр АЧХ канала необходимо проверять, чтобы реально исключить влияние эффекта наложения спектров. Отметим, что после процедуры децимации, т. е. фильтрации и прореживания данных, подавить помехи наложения на последующих этапах обработки сейсмических записей невозможно.

Спектральные характеристики шумов канала РОСА-А

Спектральные характеристики сейсмического волнового поля, включающего и микросейсмический шум, служат классическим инструментом анализа и интерпретации сейсмических данных. К числу традиционно используемых спектральных характеристик относятся спектральные плотности мощности и амплитудные спектры сигналов. Достаточно широкое применение получили спектральные параметры сигнала, вычисляемые в некоторой относительной ("октавной") полосе частот в области заданной текущей частоты. В последнее десятилетие успешно развиваются методики пассивной сейсморазведки по изучению

нефтегазовых объектов на основе спектрального анализа эндогенного акустического излучения [1].

Естественно, при выполнении спектрального анализа сейсмических данных и особенно слабых сигналов, важно знать и спектральные оценки аппаратных шумов канала регистрации. Известно, что важным условием для увеличения отношения сигнал/шум посредством частотной фильтрации является соответствие аппаратных помех «белому» шуму низкой интенсивности. Считается, что при малоинтенсивном равномерном аппаратном шуме цифрового канала регистрации увеличение отношения сигнал/шум обеспечивается посредством точечного группирования сейсмоприемников.

Спектры аппаратных шумов цифрового канала сейсмических регистраторов семейства РОСА®, вычисленные на эквиваленте геофона 510 Ом при значении коэффициента усиления равном единице, показаны на рисунке 1 в логарифмической шкале по частотам и уровню сигнала. Как следует из приведенного графика, аппаратный шум является равномерным и мало интенсивным на частотах до 1 кГц.

Исследования собственного шума канала регистрации автономной сейсмостанции РОСА-А в области нулевой частоты были инициативно проведены доктором технических наук Юшиным В.И. (Институт нефтегазовой геологии и геофизики СО РАН). Методика эксперимента включала анализ непрерывной записи шума длительностью около 8 минут. Полученная информация была обработана посредством рекурсивной низкочастотной фильтрации Баттерворта 2 порядка с частотой среза 0.125 Гц, после чего децимирована в 50 раз, т. е. на частоту дискретизации 2.5 Гц. Вход регистратора нагружался на внешний резистор 300 Ом. Зарегистрированные шумы и дрейфы в области низких частот представлены на рисунке 2. Как видно из этого графика, дрейф в полосе до 0.125 Гц не превышает (плюс/минус) двух квантов.

Оценка уровня шума канала регистрации РОСА-А при точечном группировании

Оценка шума канала регистрации РОСА-А при точечном группировании сейсмоприемников была выполнена по измерениям на эквиваленте одного геофона в 300 Ом и эквиваленте группы из 16 геофонов 4800 Ом. Коэффициент усиления устанавливался равным 1 и 16, период квантования был

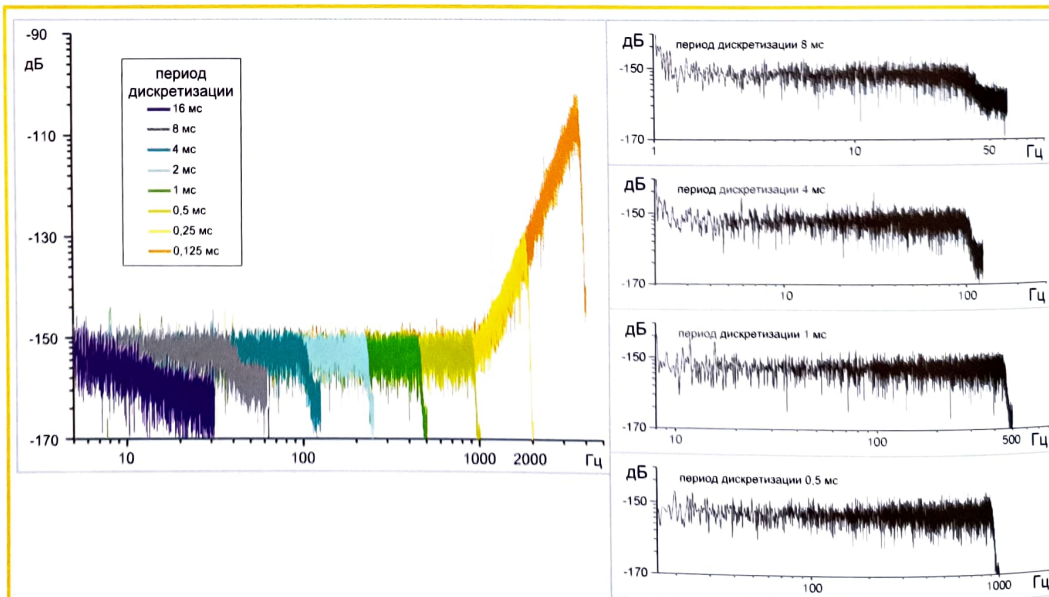


Рис. 1. Амплитудно-частотные характеристики шумов цифрового канала регистрации РОСА-А (на эквиваленте геофона 510 Ом).

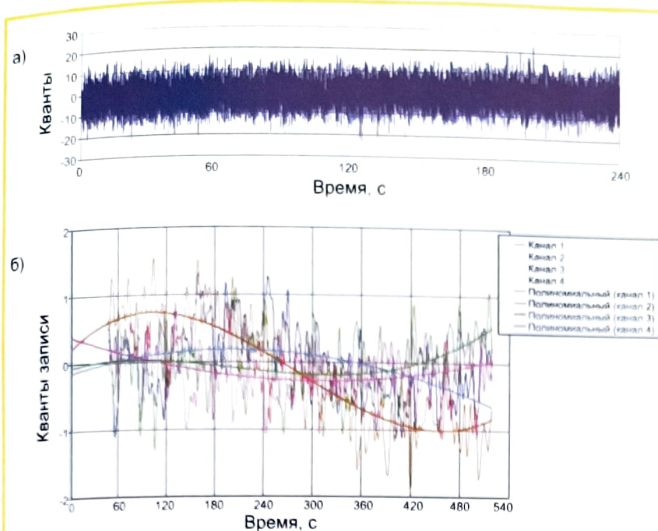


Рис. 2. а) Установившийся шум через 13 минут записи б) Шумы и дрейфы цифрового канала регистрации РОСА-А в области нулевой частоты

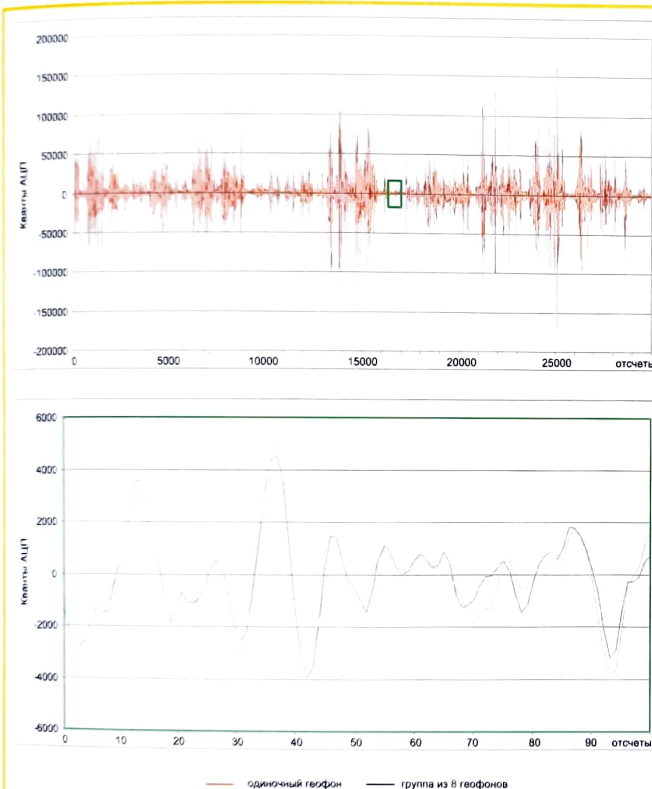


Рис. 3. Нормированные записи микросейсм и фрагмент записи особо малых сигналов в увеличенном масштабе



Рис. 4. Автономный регистратор РОСА-А на опорном профиле 3-ДВ (Южный участок, 2009 г.)

задан равным 1 мс. При более высоком коэффициенте усиления шум увеличивается и составляет 4,8 (в квантах АЦП) при коэффициенте усиления 16 против 1,5 при коэффициенте усиления 1, в результате мДД, соответственно, снижается. При группировании аппаратный шум в пересчете на один датчик уменьшается в 3,2 раза: 0,24 мкВ одиночный (коэффициент усиления 16) и 0,0075 мкВ в группе (коэффициент усиления 1).

В зимних полевых условиях эксперименты по точечному группированию геофонов были проведены на геофизическом полигоне ГС СО РАН (Новосибирская обл., п. Ключи). Микросейсм регистрировались в ночное время с использованием сейсмоприемников СВ-5 как одиночными, так и точечной группой из 8 штук. Нормированные записи микросейсм приведены на рисунке 3, на котором интервал регистрации особо малых сигналов показан в увеличенном масштабе. По приведенным графикам (рис. 3) можно детально проследить весьма близкое совпадение сигналов с небольшими флуктуациями, часть которых допустимо отнести на провода и влияние на них ветра.

В целом, по результатам этих работ можно отметить, что минимальный уровень микросейсм (более 100 квантов АЦП) существенно (более чем в 100 раз) превышает уровень аппаратного шума (0,23 кванта). Поскольку указанные шумы не коррелированы, то аппаратный шум влияния на конечный результат практически не оказывает. Учитывая малый уровень аппаратных шумов, можно рекомендовать использование для регистрации в качестве основного коэффициент усиления 1, что обеспечивает максимальный мДД регистрации без группирования геофонов.

Сейсмические исследования с автономными регистраторами РОСА-А

Автономная сейсмическая станция РОСА-А (рис. 4 новая РОСА-А) предназначена для выполнения высокоточных сейсмических измерений, в том числе длительных (свыше 10 суток), без предварительной временной настройки при любом заданном режиме работы с источниками различного типа возбуждения упругих колебаний (взрывными, импульсными и вибрационными) [4].

Реализованная в регистраторах система синхронизации времени включает: приемник спутниковых сигналов (погрешность менее ± 1 мкс), прецизионный тактовый генератор и программу контроля синхронизации в целом. При отсутствии устойчивого приема спутниковых сигналов термостатированный генератор обеспечивает автономный режим работы при относительной погрешности $\pm 10-8$ (погрешность менее ± 1 мс/сутки).

Временная привязка сейсмических записей осуществляется в момент регистрации данных. Такая организация регистрации и сбора данных

ПОЛЕВЫЕ СЕЙСМОРАЗВЕДОЧНЫЕ КОМПЛЕКСЫ ПРИБОРЫ И СИСТЕМЫ



Рис. 5. Полевые сейсмограммы ГС3-ОТВ (3-ДВ, Центральный участок, 2010 г.)

позволяет исключить радиоканал для синхронизации, телеметрическую систему управления и передачи цифровой информации значительных объемов.

Комплексную проверку функционального состояния модуля регистрации РОСА-А можно выполнить в любое время с использованием компьютера и подключением через Ethernet порт. В реальном времени на мониторе можно проследить и контролировать сигналы, принятые сейсмодатчиками, оценить состояние системы синхронизации, выполнить мониторинг технических параметров (напряжения питания, ток потребления, температуру). При необходимости, с клавиатуры можно запрограммировать режим работы автономной станции, в том числе считать, записать или изменить программу эксперимента, а также передавать полевые сейсмические данные на компьютер в реальном времени. Все метрологические параметры цифрового канала регистрации можно оперативно получить, используя встроенный тестовый генератор.

Глубинные исследования с автономными станциями РОСА-А были начаты в 2006 г. на опорном геофизическом профиле 2-ДВ в режиме апробации при проведении работ методом сейсмического зондирования (ГСЗ). В настоящее время (2010 г.) на опорном профиле 3-ДВ (Центральный участок) выполняются работы ГСЗ с системой РОСА-А в комплекте из 200 автономных регистраторов на удалении до 300 км с взрывными и вибрационными источниками (центробежные вибраторы ЦВП-40, производство ГС СО РАН, г. Новосибирск).

В статье [6] подробно освещены технология и результаты сейсмических работ периода (2006-2009 гг.) с автономными станциями РОСА-А на геотраверсах, расположенных на востоке России (2-ДВ, 2-ДВ-А, 3-ДВ), а также работы, выполненные методом ГСЗ по системе наблюдений «суша - море», увязывающие морские опорные профили 2-ДВ-М и 5-АР и сухо-путный 2-ДВ (Магаданская обл., Чукотский АО).

Автономные регистраторы были запрограммированы на запись с частотой дискретизации 8 мс. В качестве датчиков использовались сейсмодатчики СВ-5, объединенные в точечную группу из 8 штук. Получены высокого качества полевые материалы (рис. 5).

В целом, данные работы показали, что технология глубинных исследований по системам наблюдения (наземных и «суша-море») с многократными перекрытиями и регистрацией автономными станциями типа РОСА-А является эффективной и экономически выгодной.

Детальные исследования по сейсмическому «просвечиванию» угольных пластов были начаты ОАО НЦ ВостНИИ (г. Кемерово) в 2008 г. [5]. Работы в шахтах Кузбасса были продолжены в период 2009-2010 гг. с целью обнаружения и/или исключения в процессе угледобычи «внезапного» обнаружения зон геологических нарушений в угольных пластах.

Важнейшим условием использования системы сбора и регистрации сейсмических данных с автономными регистраторами РОСА-А в шахтах является обеспечение высокоточной синхронизации времени при отсутствии спутниковых сигналов. Перед началом работы станции РОСА-А на поверхности согласуются по мировому времени через спутниковые сигналы по GPS-приёмникам. Полевая методика работ на проходящих волнах включала систему многократных перекрытий. Возбуждение сейсмических колебаний осуществлялось с использованием импульсного источника (ударного типа). Для регистрации отметки момента выделяется отдельный канал регистратора РОСА-А, на вход которого поступает сигнал с датчика, расположенного в непосредственной близости от источника. Технология сейсмических работ на проходящих волнах с автономными регистраторами обладает важным преимуществом - это отсутствие проводных линий между пунктом возбуждения и пунктом приёма, находящихся в разных (параллельных) штреках.

Динамический диапазон сейсмического канала регистрации и система временной привязки автономной станции позволили получить высокоразрешенный материал на частоте дискретизации 0,5 мс (рис. 6).

Выводы

В результате исследований в области регистрации слабых сейсмических сигналов было показано, что малозумящий высокочувствительный цифровой канал автономной станции РОСА-А позволяет регистрировать сигналы в широком частотном диапазоне: от нуля до 3,2 кГц.

Экспериментально показано, что низкий уровень собственных аппаратных шумов позволяет

отказаться от точечного группирования геофонов. Качественный цифровой канал записи служит определяющей основой для реализации современного класса сейсмической аппаратуры - автономного регистратора, совмещенного с геофоном. При выполнении последнего экранированным устраняется практически полностью синфазная помеха.

Высококачественный цифровой канал в 24 разряда автономных регистраторов РОСА-А имеет динамический диапазон, достаточный для регистрации слабых сейсмических сигналов на уровне низких микросейсм и позволяет провести широкий спектр сейсмических и сейсмологических исследований, включая методики пассивной сейсморазведки и режим наблюдения в реальном времени.

Бескабельная система на базе автономных регистраторов РОСА-А была успешно апробирована в шахтной сейсморазведке при отсутствии спутниковых сигналов системы GPS.

В заключении следует сказать, что техническая составляющая новых технологий сейсмических исследований в области регистрации сейсмических данных, в том числе с возможностью выделения слабо выраженных трансформаций энергии, достаточна совершенна. Важно в дальнейшем, с учетом появления новейшей элементной базы, сосредоточиться на вопросах снижения себестоимости, уменьшения веса и энергопотребления, повышения надежности и качества сервисных функций сейсмических систем регистрации и сбора данных.

Авторы признательны доктору технических наук Юшину Вячеславу Ивановичу за особое внимание к нашим техническим результатам по регистрации сейсмических сигналов и за проведенные исследования с автономной станцией РОСА-А.

Публикации

1. Ведерников Г.В. [2006]. Новые возможности изучения геодинамических шумов от нефтегазовых залежей // Геофизика, №5.
2. Ермаков Б.Д. [1995]. Особенности регистрации слабых сигналов в сейсморазведке // М.: АОЗТ «Геоинформмарк».
3. Рей Клиффорд Х., Фисселер Гленн Д., Хейгуд Хэл Б. [2009]. Способ и установка для наземной регистрации // Патент RU № 2352960 (Фэйрфилд индастриз, инк. (US)). Бюл. №11.
4. Сагайдачная О.М., Сальников А.С., Сагайдачный А.В., Шмыков А.Н. [2008]. Бескабельная система регистрации РОСА-А – техническая основа активного и пассивного сейсмического мониторинга // 5-я международная выставка «НЕДРА-2008», тезисы научно-технической конференции «Технико-технологическое обеспечение геологоразведочных работ. Проблемы и перспективы», 1-4 апреля 2008 г., Москва, Официальный каталог ВВЦ.
5. Сагайдачная О.М., Дунаева К.А., Сальников А.С., Потапов П.В., Гриценко С.А. [2008]. Сейсмические работы по прослеживанию угольных пластов с использованием автономных станций

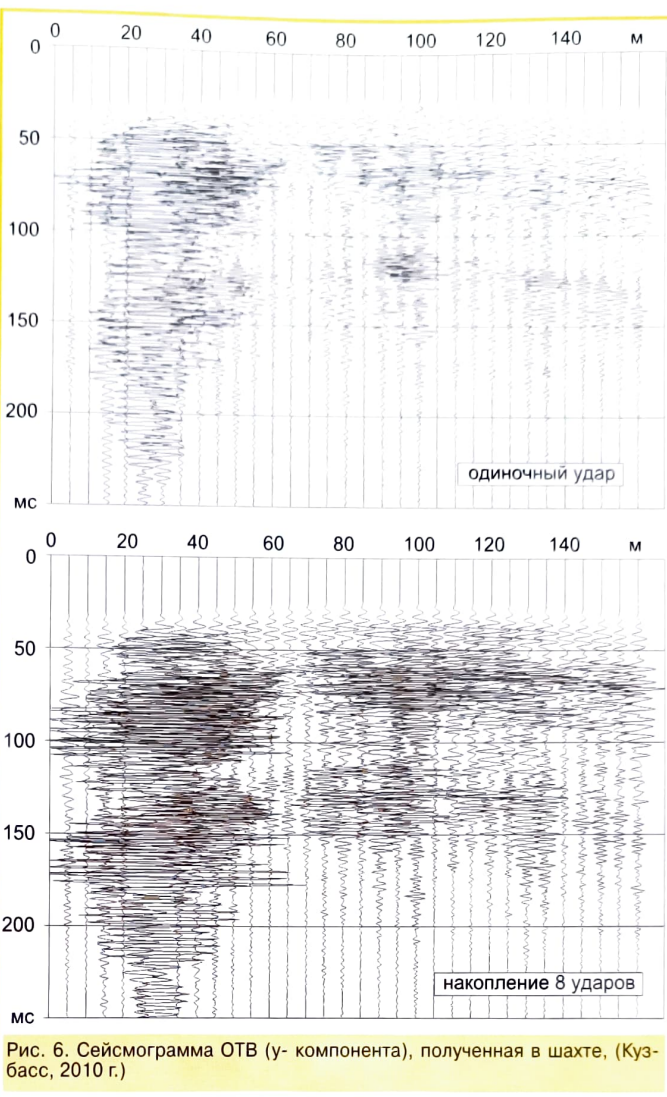


Рис. 6. Сейсмограмма ОТВ (y- компонента), полученная в шахте, (Кузбасс, 2010 г.)

РОСА-А // Приборы и системы разведочной геофизики, №4.

6. Сальников А.С., Сагайдачная О.М., Липилин А.В., Сулейманов А.К., Соловьев В.М., Рослов Ю.В. [2009]. Полевые сейсмические работы на опорных профилях северо-востока России // Приборы и системы разведочной геофизики, №2.
7. Flavell Smith J. [2006]. How a new cable-less land seismic survey acquisition system was born // FIRST BREAK, February 2006, v 24.
8. Heath B. [2008]. Land seismic: the move towards the mega-channel // FIRST BREAK - An EAGE Publication, February 2008, v 26.
9. Heath B. [2010]. Weighing the role of cableless and cable-based systems in the future of land seismic acquisition // FIRST BREAK - An EAGE Publication, June 2010, v 28.
10. Mougnot D. [2010]. Land cableless systems: use and misuse // FIRST BREAK - An EAGE Publication, February 2010, v 28.
11. Sagaidachnaya O.M., Sagaidachny A.V., Salnikov A.S., Shmykov A.N., Shegolkov A.V. [2007]. A Distributed Data Recording System as a Basis for Modern Seismic Research Technologies // 69th EAGE Conference & Exhibition, London, Abstracts P187.
12. Sagaydachnaya O.M., Salnikov A.S., Vershnin A.V., Sagaydachny A.V., Shmykov A.N. [2010]. Seismic Channel Basic Characteristics for Weak Signal Registration by Point Group of Geophones // 72th EAGE Conference & Exhibition, Barcelona, Abstracts P292.

ПОЛЕВЫЕ СЕЙСМОРАЗВЕДОЧНЫЕ КОМПЛЕКСЫ ПРИБОРЫ И СИСТЕМЫ