

Успешные опытные работы открывают путь к применению в России вибрационной сейсморазведки на низких частотах

- Никола Тэлье*, компания Sercel, Франция
- Дагаев И., АО «РИТЭК», г. Самара
- Больбат В., ПАО «ГЕОТЕК Сейсморазведка», г. Тюмень

Вступление

В современной мировой истории сейсморазведки ключевыми вехами являются 90-е годы, когда произошел переход от 2Д к 3Д, и 2000-е годы, которые ознаменовались увеличением производительности партий за счет применения новых методик возбуждения. Нынешнее десятилетие, итоги которого пока еще рано подводить, тем не менее, уже способно дать нам представление о тех инновациях в области сейсморазведочных работ, которые оно привнесло. В настоящее время выделяют 4 новых тенденции в развитии сейсморазведки:

- Широкополосная сейсморазведка, т.е., расширение диапазона сейсмического сигнала в области высоких и низких частот;
- Уплотнение расстановки пунктов возбуждения и пунктов приёма (как вдоль, так и поперек линий приёма);
- Уменьшение групп источников и приёмников или отказ от группирования;
- Переход к широкоазимутальной съемке (вплоть до полноазимутальной) и регистрация на больших удалениях.

Среди этих направлений широкополосная сейсморазведка получила самое впечатляющее развитие, так как существует точная корреляция между диапазоном частот массива данных и качеством построения изображения среды, причем значительные усилия были сконцентрированы в области использования низких частот. В отличие от высоких частот они в меньшей степени поглощаются средой, а их присутствие в составе сейсмических данных улучшает разрешение по вертика-

ли, скоростной анализ, оценку параметров импульса и эффективность инверсии (см.: Baeten, 2013).

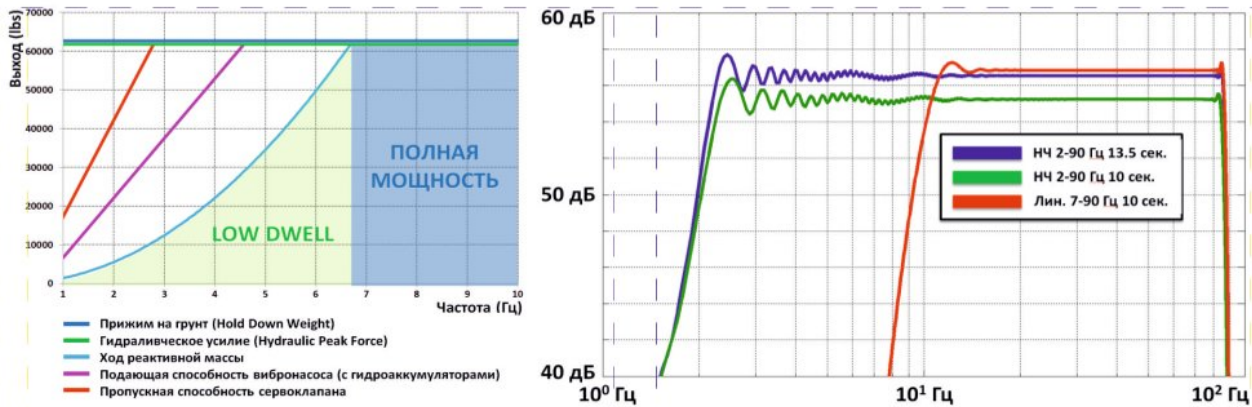
Сейсморазведка на низких частотах

Успех применения сейсморазведки с использованием низких частот достигается не только путем их возбуждения, но и их регистрацией, а также их сохранением на всем протяжении процесса обработки данных.

Возбуждение низких частот

Взрывные источники возбуждения генерируют низкие частоты при сильном заглублении мощного заряда. При этом пиковая амплитуда будет порядка 15-20 Гц. Однако низкие частоты затухают на 25дБ на Октаву ниже пиковой амплитуды сигнала и использование такого заряда будет негативно влиять на высокие частоты. Поэтому в относительно доступных для техники условиях все чаще предпочтение отдается вибраторам, которые обеспечивают преимущества в области управления сигналом (и особенно диапазоном частот) и производительности работ.

До конца 2000-х годов наиболее востребован был свип со стартовой частотой от 6 до 10 Гц. В соответствии с этим требованием вибраторы разрабатывались с выходом на полную мощность при 6-7 Гц. Тем не менее можно генерировать колебания с частотами ниже порога выхода вибратора на полную мощность, при уменьшении мощности свип-сигнала для обеспечения соответствия физическим ограничениям вибратора (Sallas, 2010).



▲ Рис. 1. – (слева) ограничения вибратора на низких частотах и соответствующие участки “low-dwell” (НЧ) и полной мощности (пример дан для вибратора, неоптимизированного для использования низких частот), и (справа) спектры стандартного свип-сигнала (красная линия) и низкочастотных свипов (синяя и зеленая линии). Длительность низкочастотного свипа должна быть увеличена (синяя линия), чтобы удерживать амплитуду, заданную для референтного свипа (красная линия).

Эти физические ограничения представлены на Рис.1 слева. Для того чтобы спектр свипа оставался ровным при любой частоте, необходимо увеличить время генерации сигнала с пониженной мощностью на заданной частоте пропорционально квадрату такого понижения мощности. Возбуждение низких частот требует большего времени по сравнению со стандартным диапазоном, отсюда и английское название “low-dwell” (то есть «низкопрофильный») таких пользовательских свипов. При разработке низкочастотного свипа на базе референтного линейного свипа (красная кривая) возможны два варианта (Рис.1, справа):

- 1) поддерживать такую же длительность свипа и согласиться с уменьшением амплитуды сигнала (зеленая кривая);
- 2) увеличить длительность свипа для поддержания такого же спектра, как у референтного линейного свипа (синяя кривая).

В последние годы рабочие характеристики вибраторов были усовершенствованы (Tellier, 2015) в основном за счет утяжеления реактивной массы и более длинного хода поршня, что дало возможность

снизить начальную частоту выхода вибратора на полную мощность и, соответственно, удлинить низкочастотный конус.

Регистрация низких частот

Периодически высказывается мнение, что начальная частота свипа не должна быть ниже, чем собственная частота геофона. Обычно это 10 Гц. Ниже собственной частоты геофона сигнал действительно затухает в соотношении 12 дБ на октаву. Поскольку диапазон между 1 и 10 Гц включает около 3-х октав, это приводит к затуханию сигнала на 36 дБ (т.е. в 63 раза меньше по амплитуде) для 1,25 Гц в сравнении с 10 Гц.

И хотя меньшие амплитуды могут быть компенсированы на этапе обработки за счет деконволюции сейсмических трасс формой импульса датчика, необходимо иметь в виду, что низкие частоты в меньшей степени подвержены поглощению, а шум источника будет подавлен в той же степени, что и сигнал. Известно, что уровень микросейсм обычно повышается в направлении низких частот, иногда превышая уровень сигнала, в основном, из-за техногенных помех.

Успешные примеры сейсморазведочных работ с использованием 10-Гц геофонов были описаны в литературе (Mahgoobi, 2012). В то же время производители оборудования разработали новые датчики с улучшенными параметрами регистрации низких частот, например, с собственной частотой в 5 Гц или цифровые датчики (Lainé, 2014).

Обработка низкочастотных сигналов

При стандартной обработке низкие частоты обычно теряются. Поэтому несколько опытных работ в прошлом не смогли показать существенное преимущество от использования широкополосности на итоговом этапе окончательного построения сейсмических изображений, в то время как исходные записи включали в себя значительную низкочастотную компоненту (присутствующую не только в сигнале, но и помехах, в частности, в поверхностных волнах).

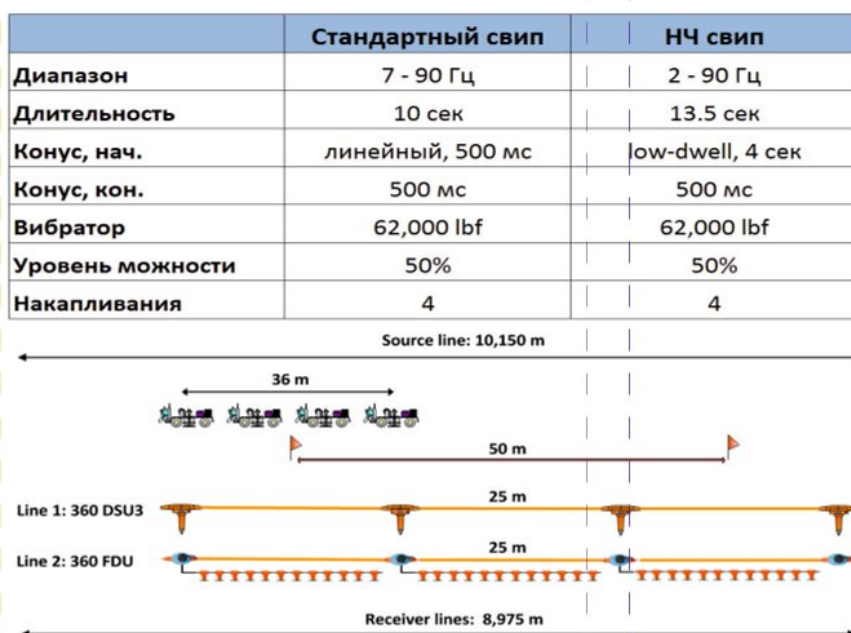
Для сохранения низких частот требуется специальная обработка. Кроме коррекции по импульсным характеристикам

датчика (деконволюции с использованием формы импульса датчика), она обычно включает в себя (Retailleau, 2014):

- Сохранение широкого диапазона частот за счет разделения данных на октавы и обработки каждой октавы отдельно;
- Умеренные параметры и фильтры;
- Более длинные временные и пространственные окна операторов (значительные поправки удаляют низкие частоты вместе с шумами);
- Усиленный контроль качества на протяжении всего графа обработки для проверки целостности низких частот.

Опытные работы с использованием низких частот в России

В последние годы в России появился определенный интерес к использованию низких частот, но никто не работал на частотах ниже 5,5 Гц. Для тщательного изучения преимуществ низких частот при визуализации сейсмических изображений компания РИТЭК – технологическое подразделение компании ЛУКОЙЛ – в



▲ Рис. 2. Схема опытных работ: параметры свипа (вверху слева), геометрия расстановки (внизу слева), источники (вверху справа), цифровые акселерометры DSU-428 (в середине справа) и фото с места опытных работ (внизу справа).

феврале 2016 г. провела опытно-методические сейсморазведочные работы совместно с оренбургским подразделением компании «ГЕОТЕК Сейсморазведка» и компанией SerceI. Целью работ стало сравнение низкочастотного свипа (от 2 Гц) со стандартным свипом (от 7 Гц), а также оценка работы двух типов датчиков – 10-Гц геофонов и цифровых акселерометров.

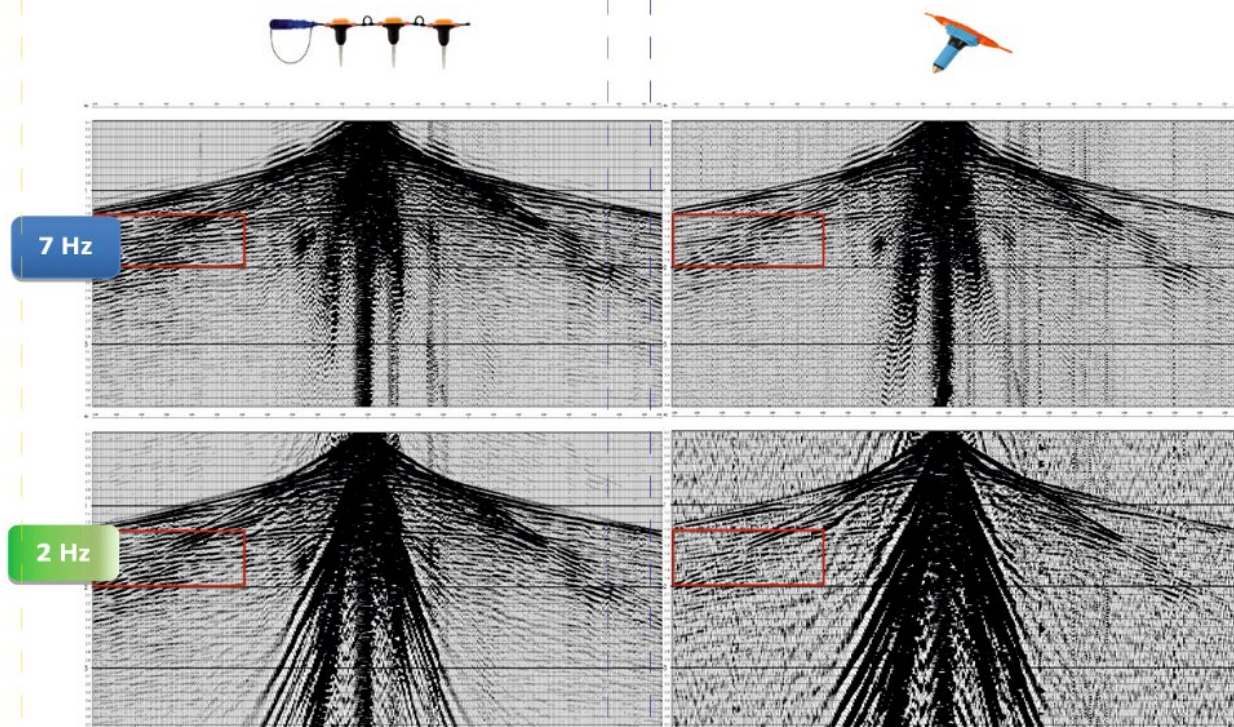
В ходе опытных работ были использованы вибраторы Nomad-65 2007 года выпуска со стандартным возбудителем вибраций (не оптимизированным для низких частот). 2-Гц низкочастотный свип был разработан, чтобы как можно более точно соответствовать физическим ограничениям вибратора в соответствии с принципами, изложенными выше. Длина свипа составила 13,5 секунд для поддержания одинакового спектра с референтным свипом. Необходимо отметить, что линейный свип в 7-90 Гц достигает полной амплитуды только при 10 Гц. Это происходит из-за использования линейного конуса в 500 мс (т.е., конуса Блэкмена, который чаще всего используется в отрас-

ли), в то время как низкочастотный конус дает полную амплитуду с самого начала свипа, чуть выше 2 Гц (Рис. 1, справа). Основные параметры отражены на Рис. 2.

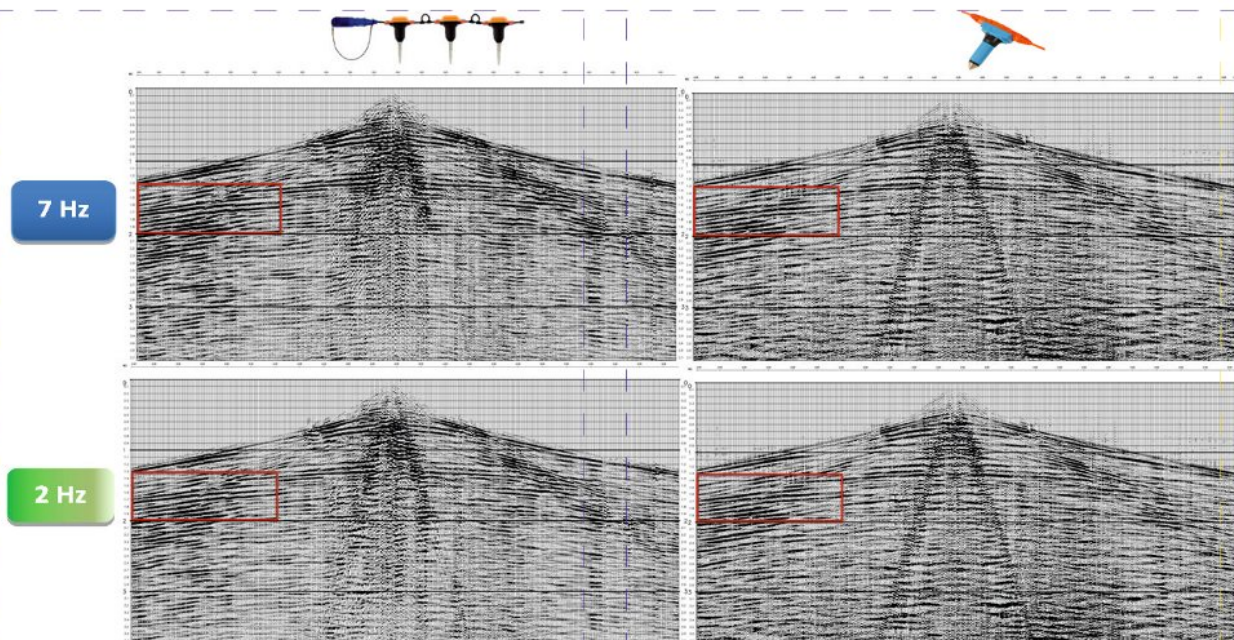
9 км вдоль линии возбуждения 2D (204 ПВ, номинальная кратность 80) были отработаны дважды: с использованием стандартного свипа и с использованием низкочастотных свипов, с регистрацией 4-х наборов данных, описанных ниже:

- Стандартный свип с 10 Гц геофонами ("7 Гц-ГЕО") и цифровыми датчиками ("7Гц-DSU");
- Низкочастотный свип с 10 Гц геофонами ("2 Гц-ГЕО") и цифровыми датчиками ("2Гц-DSU").

На рис. 3 представлены исходные сейсмограммы для 4-х массивов данных. Здесь введены только статические поправки по данным преломленных волн и выполнено интегрирование данных ускорения цифрового датчика в скорость (обязательное условие для сравнения датчиков). Значительное содержание низких частот наблюдается на массивах



▲ Рис. 3. Исходные сейсмограммы. Спектр в выбранных красных окнах показан слева на рис. 7



▲ Рис. 4. Сейсмограммы после подавления шумов. На рис.7 (в центре) показан спектр в выбранном красном окне.

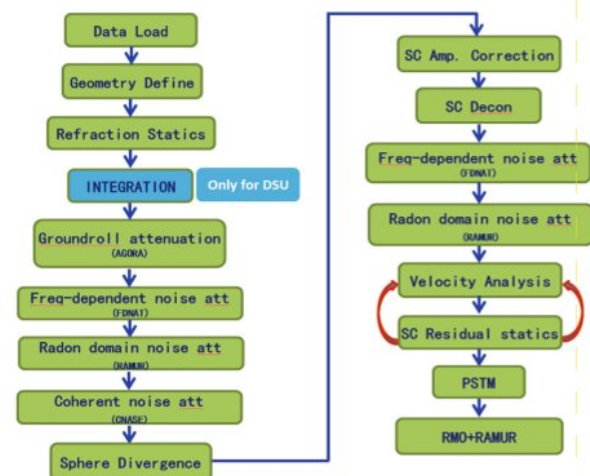
данных, полученных при использовании 2Гц-ГЕО и 2Гц-DSU (спектр показан слева на Рис. 7), но на данном этапе невозможно отделить низкочастотный сигнал от сопутствующего низкочастотного шума (например, волны Релея, шумы окружающей среды и т.д. ...). Однако, после применения алгоритмов подавления шумов (Рис. 5) становится очевидным, что низкие частоты, наблюдаемые на необработанных сейсмограммах, содержат сигнал (Рис. 4 и соответствующий спектр на Рис.7 в центре).

Эти четыре массива данных были обработаны по единому графу (Рис.5), чтобы сравнение было непредвзятым (за исключением обязательного интегрирования для DSU). Преимущество низких частот становится очевидным после временной миграции до суммирования PSTM, где заметно более глубокое проникновение сейсмического сигнала, более выразительные амплитуды и непрерывность амплитуд на отраженных сейсмических сигналах (Рис.6). Самое интересное в том, что для данного теста не была применена специальная обра-

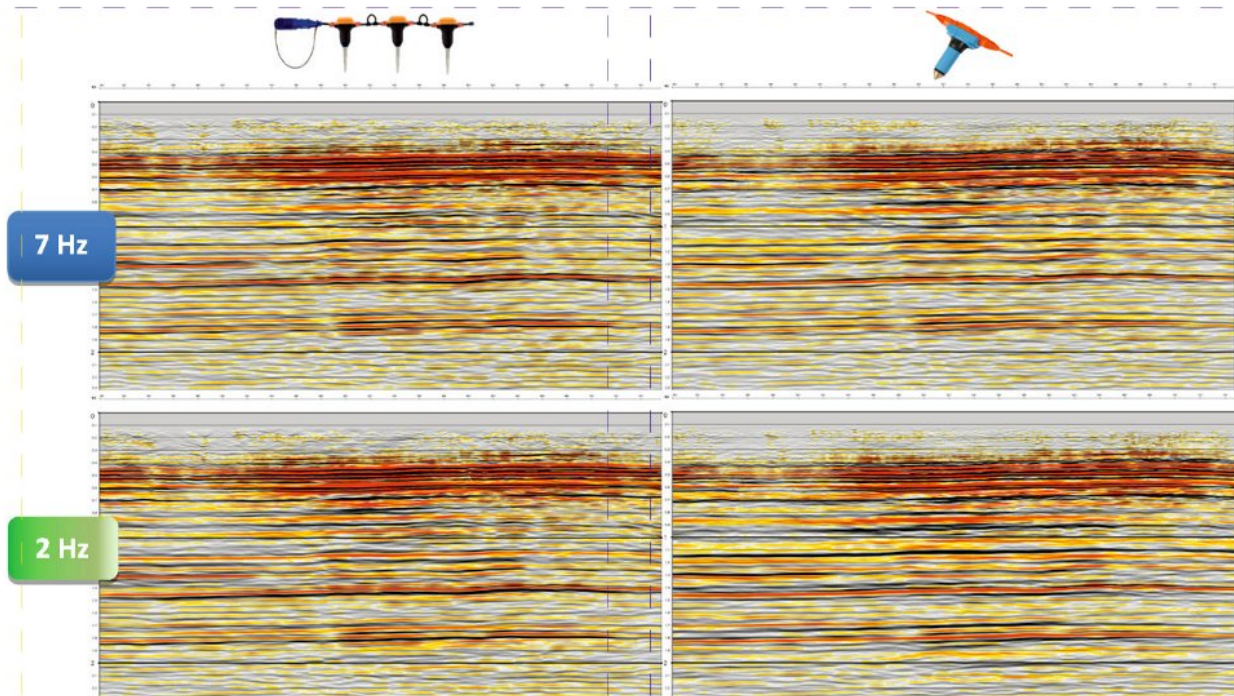
ботка для низких частот, такая как, например, обработка по октавам. Такая обработка еще более четко показала бы преимущества работы на низких частотах.

О датчиках

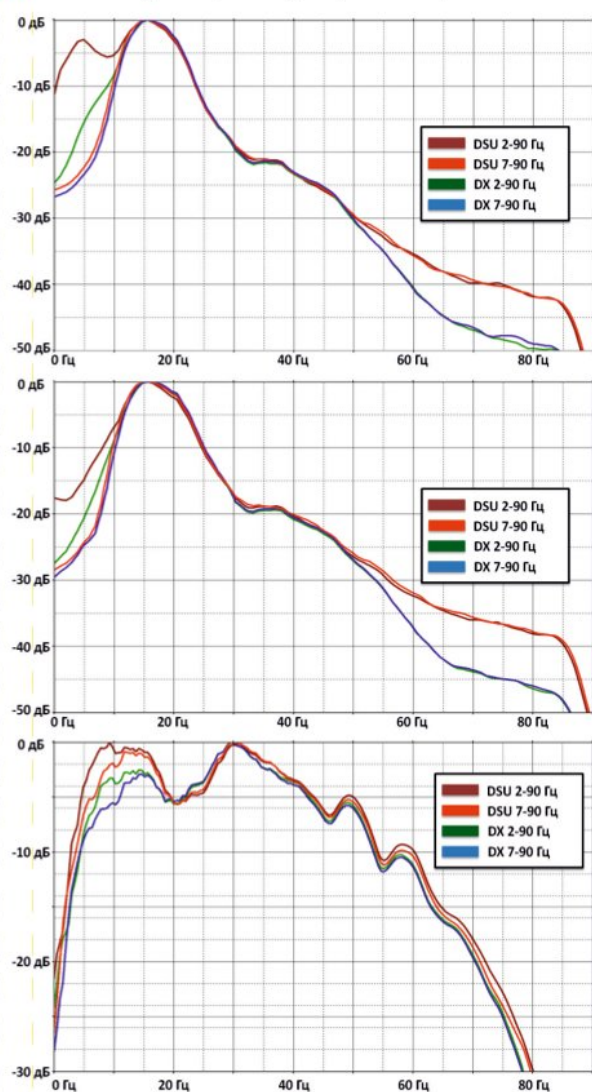
Качество данных, полученных с помощью цифровых датчиков, превосходит качество данных, полученных с помощью группы геофонов (Рис. 7. снизу). На это стоит обратить внимание, поскольку



▲ Рис. 5. Для 4х массивов данных были применены идентичные графы обработки (за исключением интегрирования для DSU-428).



▲ Рис. 6. Суммарные разрезы с временной миграцией до суммирования.



▲ Рис. 7. Спектр (сверху) по исходным данным, в центре – после подавления когерентных шумов и снизу – суммарный разрез после временной миграции до суммирования. Спектр относится к красному окну, показанному на Рис. 3.

ку выбранные параметры опытных работ были не в пользу цифровых датчиков:

- 1 DSU сравнили с 12 геофонами, поэтому на исходных данных у геофонов теоретическое преимущество отношения сигнал/помеха окружающей среды v_{12} . Стандартное «эмпирическое правило» при замене геофонов на DSU-интервал между DSU (в зависимости от уровня помех) должен быть примерно в следующих пределах: в 2 раза шире интервала между геофонами, и наполовину меньше интервала между каналами (Mougenot, 2011);

- Для геофонов и DSU был применен один и тот же граф обработки данных (за исключением интегрирования DSU).

В результате можно отметить, что цифровые датчики могли бы дать лучшие результаты если бы была использована более подходящая геометрия расстанов-

ки и специальный граф обработки. Новое поколение цифровых датчиков (DSU-508) обладает еще лучшими характеристиками при регистрации низких частот, в особенности благодаря сверхнизкому уровню собственного шума, который меньше, чем у одного геофона, подсоединенного к АЦП (Lainé, 2014), что позволяет точнее охарактеризовать более глубокие и слабые целевые горизонты.

Заключение

Опытные работы, представленные здесь, подтвердили, что низкие частоты могут быть эффективно применены в российских сейсморазведочных проектах, и что их правильное возбуждение, регистрация и обработка обеспечивают более качественное сейсмическое изображение среды. Также было доказано, что для такой методики вполне подходят существующие вибраторы, находящиеся в эксплуатации около 10 лет и не оптимизированные для возбуждения НЧ-сигнала. В то время, как сейсморазведка на низких частотах становится мировым стандартом (в Северной Америке, на Ближнем Востоке, в Китае и т.д.), данные опытные работы показали эффективность этой методики и в российских условиях, что дает возможность перейти от опытных работ к внедрению НЧ-метода в производственных проектах, а это в свою очередь позволит получать более информативные исходные данные и качественно улучшить результаты интерпретации сложных целевых объектов при умеренных дополнительных расходах.

Благодарность

Авторы выражают благодарность коллективу СП-10 ПАО «ГЕОТЕК Сейсморазведка» и лично Ильфату Мустафину и Александру Маркелову за тщательную подготовку к опытным работам и высокую производительность во время их прове-

дения, а также Lv Shuying, Владимиру Борею, Михаилу Савину и Игорю Третьякову (Sercel) за их вклад в опытные работы и полученные результаты.

Литература

Baeten, G., Willem de Maag, J., Plessix, R.E., Klaassen, R., Qureshi, T., Kleemeyer, M., Kroode, F. and Rujie, Z., 2013, The use of low frequencies in a full-waveform inversion and impedance inversion land seismic case study: Geophysical Prospecting, 61, 701–711.

Д. Букар, Ж. Оливрэни, Д. Мужно, Низко-частотные свипы с вибраторами Nomad 65, электроникой CE464 и программой «CheckSweep»: Приборы и Системы разведочной геофизики 3(45)/2013, 33-43

Mougenot D., Cherepovskiy and Junjie L., 2011, MEMS-based accelerometers: expectations and practical achievements: First Break, 29/2, 85-90

Lainé J. and Mougenot D., 2014, A high-sensitivity MEMS-based accelerometer: The Leading Edge 33/11, 1234-1241

Mahrooqi S., Rawahi S., Yarubi S., Yahyai A., Hunt K., Clow F. and Vincent I., 2012, Cracking very LF land seismic acquisition – A step change: 74th EAGE Conference & Exhibition, extended abstract

Retailleau M., El Asrag R. and Shorter J., 2014, Processing land broadband data: challenges that Oman surveys present and how they are addressed: EAGE/SPG Workshop on Broadband Seismic, Expanded abstract.

Sallas, J. J., 2010, How do hydraulic vibrators work? A look inside the black box: Geophysical Prospecting, 58, 3–17.

Н.Тэлье, Ж. Оливрэни, Д. Букар, 2015, Применение сейсмовибраторов для эффективной генерации низких частот и высокой производительности поисковых работ: FirstBreak, 33/1, 77-83