

Вертикальное сейсмическое профилирование (ВСП) на геофизических симпозиумах SEG Хьюстон 2013 г и EAGE Амстердам 2014 г

■ Шнеерсон М.Б., РГУ нефти и газа, Жуков А.П., ООО ГСД, г. Москва

Вертикальное сейсмическое профилирование (ВСП), применяемое для изучения и анализа возбуждаемых и регистрируемых волновых полей, детального освещения строения прискважинного пространства и определения физических свойств пород, получило повсеместное практическое применение и достаточно широко представлено на геофизических симпозиумах. На симпозиумах SEG в Хьюстоне 2013 г и EAGE в Амстердаме 2014 г доклады, посвященные этому методу разведочной геофизики, были доложены на нескольких секциях, и по своему содержанию охватывали вопросы аппаратуры и методики проведения скважинных сейсмических наблюдений, обработки материалов и решения некоторых практических задач. Содержание этих докладов в определенной степени отражает основные направления развития ВСП за рубежом и их рассмотрение может представлять интерес для отечественной геофизики.

1. Расширение частоты возбуждаемых колебаний

Расширение частотного диапазона возбуждаемых колебаний до 5 – 6 октав, широко обсуждаемое и применяемое в наземной вибрационной сейсморазведке, получает применение и при работах ВСП на суше. Общепринятая технология работ предусматривает возбуждение колебаний в полосе частот от 8 – 10 Гц до 80 – 100 Гц, т.е в пределах 3,0 – 3,5 октав. Современные подходы к качеству материалов и результатам их обработки и интерпретации требуют расширения полосы частот регистрируемых колебаний до 5 – 6 октав. Практика показывает, что это позволяет увеличить глубинность разведки, снизить уровень корреляционных шумов и повысить отношение сигнал/помеха, а в итоге получить более качественные и достоверные результаты инверсии. Анализ возможности расширения октавности вибрационных записей показал на перспективность смещения частоты возбуждаемых колебаний в сторону низких (до 1 – 4 Гц), а не высоких частот. Обусловлено это наличием частотно – зависимого затуханием волн, что делает практически нереальным

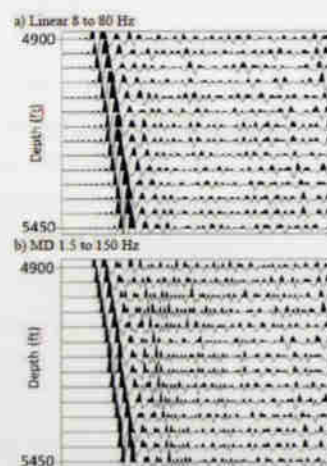
удвоение верхнего диапазона частот до 250 – 300 Гц при поисково-разведочных работах на нефть и газ и даже при регистрации волн в скважинах. При уходе в сторону низких частот имеется практическая возможность достижения желаемой октавности записей. Так, например, при начальной частоте 4 Гц для получения шестиоктавного управляющего сигнала конечная частота должна быть равной 130 Гц, что вполне приемлемо.

Однако, переход на низкие частоты сопряжен с необходимостью преодоления определенных технологических трудностей и при скважинных наблюдениях, связанных с особенностями работы вибраторов на низких частотах. Применительно к работам ВСП это требования: к транспортной базе – мобильность с учетом возможных больших расстояний между скважинами, к вибратору - обеспечение заданного широкого частотного диапазона возбуждаемых колебаний и значительных усилий воздействия на среду из-за того, что в большинстве случаев при работах на скважине отказываются от группирования источников и ограничиваются одним, но мощным излучателем.

В докладе «Повышение разрешенности наземных записей ВСП на основе применения широкополосных вибрационных источников, Improving land VSP resolution through the use of broad band vibroseis source, T. Dean, J. Tubett, M. Pickett, D. Lane» [1] приведены материалы по созданию и экспериментальному опробованию широкополосного вибратора с учетом особенностей проведения скважинных сейсмических наблюдений. В нем отмечается, что сейсмический вибратор, как источник колебаний, оптимален для работ ВСП, т.к. он обеспечивает хорошую повторяемость воздействия и текущий контроль параметров излучаемых колебаний по уровню и частоте и весьма эффективен по стоимости.

Под излучатель для ВСП в качестве транспортной базы выбран восьмиосный автомобиль повышенной грузоподъемности и проходимости для размещения на нем мощного гидравлического вибратора, позволяющего работать в одиночном режиме, и способного передвигаться по шоссейным и грунтовым (в пустынных районах) дорогам на значительные расстояния и подъезжать непосредственно к скважинам. Эффективное возбуждение низких частот обеспечивается увеличением инерционной массы излучателя (с 5800 фунтов до 8490 фунтов) и веса при груза. Для возбуждения сдвинутых в сторону низких частот колебаний применен нелинейный свип-сигнал «максимальной длительности», позволяющий генерировать волны, начиная с 1.5 Гц. Новый излучатель был опробован при работах на одной из скважин с регистрацией волн в первых и последующих вступлениях. Материалы скважинных наблюдений, которые были проведены в интервале глубин от 350 до 7500 фт с шагом 50 фт со стандартным (8 – 80 Гц) и

расширенным в сторону низких частот (1,5 – 150 Гц) свипами, иллюстрируют работоспособность вибратора и возможность получения более разрешенных и лучших по качеству записей в первых и последующих вступлениях (Рис. 1).



▲ Рис. 1. Записи волн в первых и последующих вступлениях, полученных с линейным (а) и расширенным в сторону низких частот (б) свипами

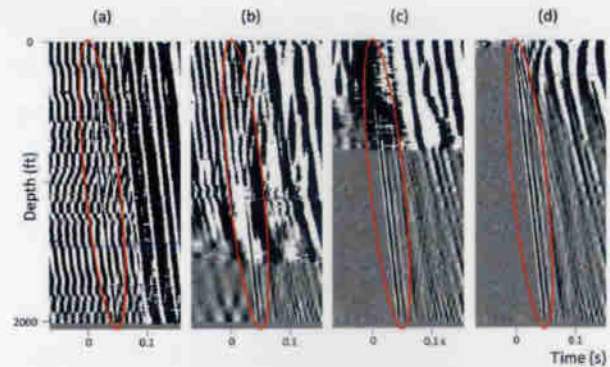
2. Опробование оптико-волоконных распределенных приемных систем (DAS, distributed acoustic sensing) при работах в скважинах.

Определенные перспективы совершенствования приемных устройств в сейсморазведке авторы связывают с использованием оптико-волоконных систем, позволяющих осуществить непрерывную регистрацию волн по стволу скважины. Их основные преимущества - относительно низкая стоимость, возможность создания больших приемных групп и простота применения, а недостатки - высокий уровень шумов, что требует применения специальных способов для их ослабления и трудности с определением положения регистрирующего сегмента кабеля.

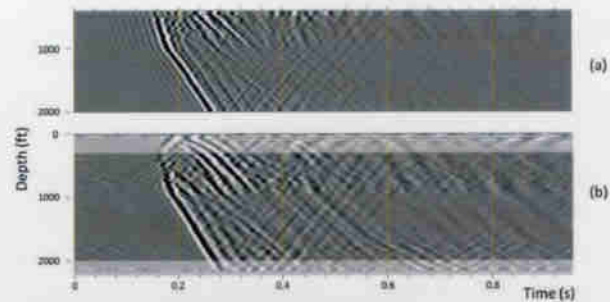
В докладе «Вертикальное сейсмическое профилирование со смешанным оптико – электрическим кабелем, Multi-vertical seismic profile acquisition with

hybrid optical-electric wire cable A.H. Hartog, B. Frignet, D. Mackil, W. Allard» [2] приведены результаты работ по использованию такого кабеля с гетеродинным преобразованием регистрируемых сигналов при наблюдениях в двух скважинах глубиной 330 и 660 м. Для получения сопоставимых данных был изготовлен смешанный оптико-электрический кабель, который имел три оптических волоконных канала и стандартную для сейсмических работ в скважине электрическую линию передачи данных. Возбуждение колебаний осуществлялось пневмо-источником и стандартными вибратором на небольших удалениях от устья скважин. Волны регистрировались с шагом 15 м по стволу в обеих скважинах. Записи со стандартным кабелем были хорошего качества. При опробовании оптико-волоконного кабеля возникла необходимость обеспечения его хорошего контакта со стенками скважины. Это было реализовано путем изменения (от максимального до оптимального) его натяжения. На рис. 2 приведены полученные сейсмические материалы. Из них следует, что при полном натяжении кабеля (рис.2а) доминируют резонансные колебания, которые полностью маскируют вступления продольных волн. Последовательное ослабление натяжения привело к улучшению контакта кабеля со средой и возможности регистрации волн по всему стволу скважины (рис. 2b,c,d). После получения хороших материалов на практически нулевых выносах от устья скважин были выполнены наблюдения на удалениях от 160 до 750 м со стандартным и новым оборудованием. На рис. 3 приведены соответствующие сейсмограммы, иллюстрирующие практически одинаковое качество, полученных материалов.

В докладе «Экспериментальные



▲ Рис. 2. Записи волн в первых вступлениях при различных натяжениях кабеля

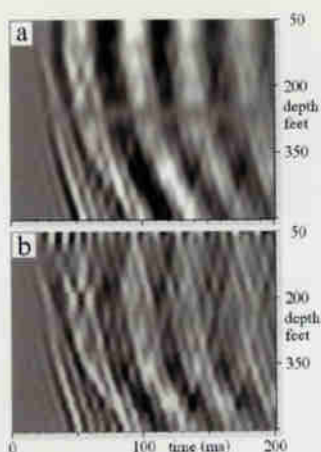


▲ Рис. 3. Волновое поле, зарегистрированное стандартным (а) и оптико-волоконным оборудованием (b)

непрерывные скважинные наблюдения с оптико-волоконным кабелем на одной из площадей на Аляске, A Permanent Borehole Fiber-optic Distributed Acoustic Sensing experiment, Q. Li, B. Hornby, J. Konkler» [1] приведены результаты регистрации волн оптико-волоконным приемным устройством (DAS) в скважине в интервале глубин от 50 до 500 футов с шагом по глубине 30 футов и стандартными приемниками продольных волн. Колебания возбуждались вибратором в отдельных точках наземного профиля протяженностью около 2 км через каждые 60 футов.

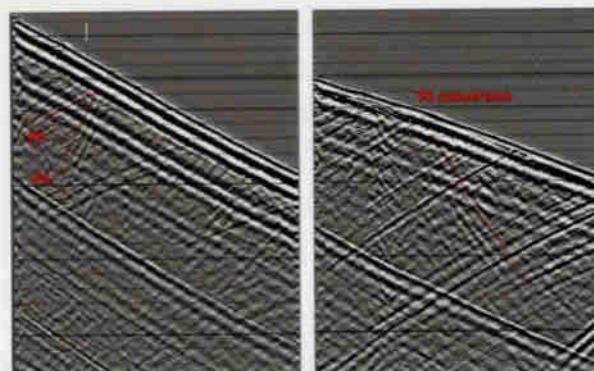
Сопоставление полученных материалов показало практическую идентичность записей, полученных с приемниками DAS и со стандартными вертикальными сейсмоприемниками.

Результаты наблюдений 3D ВСП, проведенных одновременно в двух инъекторных скважинах с распределенными акустическими системами DAS на



▲ Рис. 4. Записи волн в скважине, полученные со стандартными Z (a) и DAS (b) приемниками.

одном из глубоководных месторождений в 2012 году, приведены в докладе «Применение оптоволоконных кабелей сделало возможным проведение наблюдений 3D ВСП на глубоководном месторождении, Dual-Well 3D VSP in Deepwater Made Possible by DAS, Mateeva, J. Mestayer, Z. Yang, J. Lopez, P. Wills, J. Roy, T. Bown [1]. Оптоволоконные кабели были размещены в скважинах для контроля за давлением и температурой в них и они были использованы для регистрации волн. Кабели были прикреплены к обсадке и перекрывали практически всю глубину скважин. Возбуждение колебаний проводилось другой компанией, что определило необходимость непрерывной регистрации волн. Выделение же требуемых записей проводилось по временам производства воздействий. Качество записей оказалось хорошим и удовлетворительным. Несколько более зашумленными оказались записи на небольших глубинах. Применение соответствующих способов повышения отношения сигнал/помеха позволили выделить на сейсмограммах первые и последующие вступления волн, а ниже обсадки - отраженные PP и PS волны, а также кратные волны, образованные на границе вода – воздух. На рис. 5 приведе-



▲ Рис. 5. Примеры записей, полученные с оптоволоконным кабелем

ны полученные сейсмограммы, иллюстрирующие качество полученных записей.

В заключении отмечено, что только применение оптоволоконных кабелей сделало возможным проведение наблюдений 3D ВСП в инжекторных скважинах. Этим и определяется значимость и перспективность применения оптоволоконной техники в сейсморазведке.

3. Смешанная (blended) технология работ

Стремление к повышению производительности сейсморазведки привели к обоснованию целесообразности применения смешанной (blended) технологии работ при проведении полевых наблюдений, которая предусматривает одновременную, независимую работу нескольких источников колебаний на одну расстановку сейсμοприемников и последующее разделение волн на этапе обработки полученных записей. Это направление представляет значительный интерес и для скважинных наблюдений, т.к. позволяет сократить время на выполнение скважинных сейсмических наблюдений и снизить их стоимость. В двух практически идентичных по содержанию докладах «Изображение смешанных данных ВСП с использованием полно-

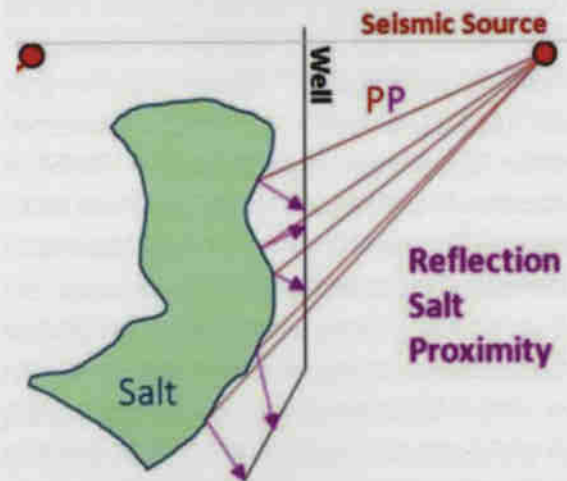
волновой миграции, Imaging blended VSP data using Full Wavefield Migration, A. K. Soni, E. Verschuur [1] и Изображение смешанных данных ВСП с использованием полно-волновой миграции в пространстве общих точек приема, Imaging of Blended VSP Data Using Full Wavefield Migration in the Common-receiver Domain, A.K. Soni, D.J. Verschuur » [2], представленных на конференциях SEG и EAGE, дано теоретическое и экспериментальное (модельное) обоснование возможности применения смешанных систем наблюдений при работах ВСП. Рассмотрены случаи смешения волновых полей при одновременной работе нескольких источников и приемников колебаний и показано, что на основе полно-волновой миграции волны с различных пунктов возбуждения могут быть разделены, что обеспечивает раздельное выделение и прослеживание волн при проведении скважинных исследований. Волны от различных пунктов возбуждения образуют взаимные помехи – шумы, однако их уровень на обработанных, результирующих материалах оказывается небольшим, поскольку они существенно подавляются в процессе проведения полноволновой миграции.

4. Околоскважинные сейсмические исследования.

Изучение и картирование боковых поверхностей сложно-построенных геологических объектов, таких как высокоамплитудные соляные купола, масштабные рифовые постройки и др., всегда были объектами прискважинных сейсмических съемок. Известные системы предусматривают регистрацию прямых проходящих волн в скважинах, буренных как в пределах изучаемого объекта, так и за его пределами.

В докладе «Картирование боковых поверхностей соляных куполов отражен-

ными волнами, Reflection Salt Proximity, Y. Li, B. Hewett» [1] рассматривается развитие этих способов прискважинных исследований на основе регистрации продольных отраженных от боковой поверхности соляного тела волн. Волны возбуждаются на поверхности и регистрируются трехкомпонентными сейсμοприемниками по стволу скважины. По полученным записям определяются и вычисляются времена прихода волн, их азимуты и вертикальные углы. По этим данным восстанавливаются траектории волн и находятся точки отражения на боковой поверхности оконтуриваемого тела. На рис. 6 приведена схема изучения боковой поверхности соляного тела.



▲ Рис. 6. Схема изучения боковой поверхности соляного тела

5. Повышение отношения сигнал/помеха при работах ВСП с вибраторами.

В докладе «Зависимость отношения сигнал/помеха от параметров вибрационного источника по материалам скважинных наблюдений, The relationship between the signal – to noise ratio of downhole data and vibroseis source parameters, T. Dean, J. Tulett» [2] теоретически и экспериментально рассмотрены возможные пути повышения отношения сигнал/помеха при скважинных наблюдениях с вибрационными источниками колебаний. Из теории следует, что отношение сигнал/помеха пропорционально

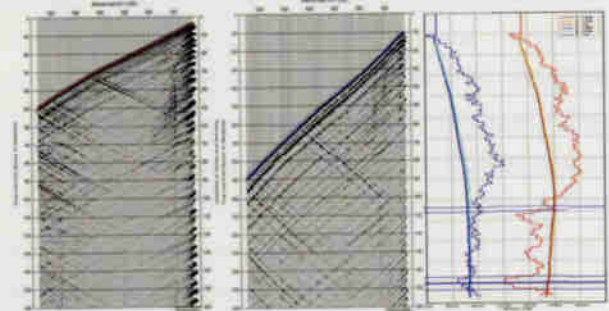
силовому воздействию излучателя на среду, помноженному на корень квадратный из длительности и числа излучаемых сигналов. Основываясь на этих соотношениях, были проведены опытные работы и получены экспериментальные данные, иллюстрирующие зависимости амплитуд волн, среднеквадратичного уровня помех и отношения сигнал/помеха от силовых параметров вибратора, длительности управляющего сигнала и числа накоплений. Наблюдения были проведены в скважине в интервале глубин от 350 до 7000 фт с шагом 50 фт. Колебания возбуждались вибратором на уровнях 35% и 70 % от максимального линейным управляющим сигналом (свипом) частотой 8–80 Гц и длительностью 2, 4, 8 и 16 с. Измеряемыми параметрами были амплитуды волн (signal amplitude), среднеквадратичные значения помех (noise RMS) и отношения сигнал/помеха (snr) на прокоррелированных записях в зависимости от числа повторений (fold).

В докладе указывается, что наиболее эффективный путь увеличения отношения сигнал/помеха и, как следствие, производительности работ ВСП и снижения их стоимости – повышение уровня возбуждаемых колебаний, поскольку это единственный параметр, который обеспечивает практически линейный рост этого отношения.

6. Возбуждение S-S волн при работах с вертикальными вибраторами

В докладе «Вертикальное сейсмическое профилирование и изображения S-S волн при работах с вертикальными вибраторами, Vertical seismic profile S-S imaging with vertical vibrators, B.E. Comish, B.A. Hardage, W. Peticios, L.N. Torres, R. Zhou, D. Quinn» [2] приведены результаты работ по выделению и прослеживанию поперечных волн в глубокой скважине при возбуждении колебаний верти-

кальными вибраторами. Колебания частотой 6–130 Гц и длительностью 12 с возбуждались двумя вибраторами и регистрировались 16-ти канальным многокомпонентным (3С) зондом в интервале глубин от 2 км до 60 м с шагом 15. Одно из условий выделения поперечных Sv и Sh волн заключалось в том, чтобы движения частиц были не в плоскости, параллельной распространению волны. Обработка материалов предусматривала сначала вращение горизонтальной (H1) и ортогональной (H2) компонент до совпадения первой с направлением максимального значения продольной волны P, а затем поворот горизонтальной радиальной (HR) и трансверсальной (HR-HT) компонент до совпадения с направлением максимальной энергии поперечной волны. После этого появлялась возможность выделения и прослеживания вступлений продольной и поперечной волн для скоростного анализа. Результаты обработки приведены на рис. 7.



▲ Рис. 7. Волновые поля по падающим и восходящим P (слева) и S (в центре) волнам, а также определенные по ним значения средних и интервальных скоростей (справа) по поперечным (голубые) и продольным (красные) волнам.

Литература

- 1 Расширенные тезисы докладов на ежегодной конференции SEG Хьюстон, 2013 г.
2. Расширенные тезисы докладов на ежегодной конференции EAGE Амстердам, 2014