

Межскважинное сейсмическое просвечивание - - опыт, методология, аппаратура

- Ошкин А. Н., Ермаков Р. Ю., МГУ им. М.В. Ломоносова, г. Москва
- Рагозин Н.А., АО «Институт «Оргэнергострой», г. Москва
- Игнатъев В.И., ООО «ГЕОДЕВАЙС», г. Санкт-Петербург

В статье рассматривается современное положение дел в вопросе межскважинного сейсмического просвечивания (МСП). Описываются применяемая аппаратура, методики полевых работ, приводится полевой материал, как ориентир для дальнейших операций с ним. Статья будет интересна в первую очередь тем, кто ищет новые возможности решения инженерно-геологических и геолого-разведочных задач. Целью статьи является популяризация метода МСП, незаслуженно редко применяемого при изысканиях.

Введение.

Метод межскважинного сейсмического просвечивания (МСП) разработан и применяется на практике с середины прошлого века [Сейсмическая..., 1990]. Его суть заключается в возбуждении упругой волны в одной скважине, регистрации в другой и дальнейшем анализе её характеристик.

В отличие от наземных методов сейсморазведки, МСП обладает рядом преимуществ, главное из которых – приближение источников и приемников к объекту исследования, и отвязка от неоднородного и поглощающего приповерхностного слоя. В отличие от каротажных работ, область исследования околоскважинного пространства в методе МСП несравненно больше и может достигать сотен метров.

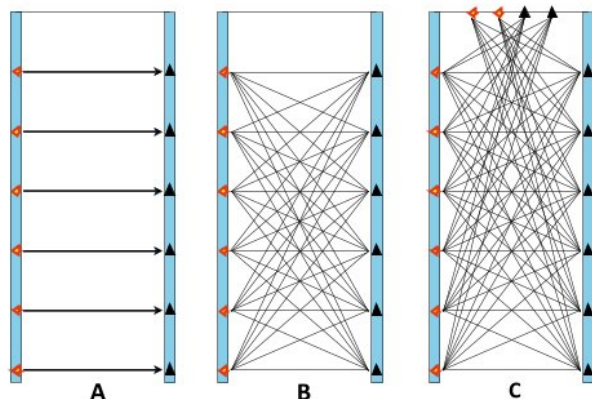
Существует 4 основные методики проведения МСП:

- однолучевое параллельное просвечивание на продольных волнах;
- многоволновое параллельное просвечивание;
- томографическое просвечивание на продольных волнах;
- многоволновое томографическое просвечивание.

Существуют и более расширенные варианты метода, когда в наблюдениях, в том числе, участвует дневная поверхность или же исследования проводятся в шахтах и штольнях в произвольной плоскости (рис.1).

На практике чаще всего реализуют наблюдения с возбуждением и регистрацией только продольных (Р) волн. Это связано с относительно простотой аппаратно-методической реализацией наблюдений, высокой скоростью производства работ и достаточно быстрой обработкой получаемых данных. Стандартным подходом к обработке получаемых данных является томографическая инверсия времен прихода первых вступлений [Ефимова, 2006; Сейсмическая ..., 1990; Болгаров 2009; Тихоцкий и др., 2011], которая позволяет восстановить распределение скорости (V) упругой волны и, при многоазимутальном покрытии исследуемой среды, параметр анизотропии (V_x/V_z) в межскважинном пространстве. В последнее время становится популярной инверсия не только времен, но и амплитуд первых вступлений, которые в сумме позволяют получить распределение декремента затухания (Q) в исследуемой среде. Восстановление распределения скорости продольной волны (V_p) обычно позволяет с достаточной достоверностью говорить о геометрии геологических объектов и их свойствах, однако переход к прогнозу прочностных и деформационных характеристик возможен только при наличии информации о распределении скоростей продольных и поперечных (S) волн.

Зарубежные изыскатели не всегда прибегают к однолучевому МСП и зачастую



▲ Рис. 1. Виды МСП: А – параллельное просвечивание; В – томографическое просвечивание; С – томографическое просвечивание с добавлением данных источников и приемников, расположенных на поверхности.

тую ограничиваются прозвучиванием на параллельных лучах. Однако стоит отметить, что за пределами России значительно выше внимание к многоволновым наблюдениям, что, судя по всему, обусловлено большей доступностью скважинных источников поперечных волн, которые давно являются стандартным оборудованием для межскважинного просвечивания, более развитым рынком геофизических услуг, меньшей зависимостью заказчиков от жесткого регулирования и регламентирования видов и объемов, необходимых к выполнению работ. Стоит отметить, что зарубежные изыскатели в основном руководствуются регулярно дополняемым стандартом ASTM D4428/D4428M, в котором, в том числе, описаны все основные требования к конструкции скважин, производству и обработке данных многоволновых наблюдений. Безусловно, наличие адекватного современным техническим возможностям общепринятого стандарта, который на момент публикации статьи имеет ревизию от 2014 года, весьма благоприятно сказывается на развитии метода МСП в целом и его многоволновой модификации. Тем не менее, в последнее время на российском рынке ситуация претерпевает

изменения и компании, профессионально занимающиеся МСП, постепенно оснащаются современным оборудованием, включающим комплекты излучателей поперечных волн и скважинные 3С регистрирующие системы.

Говоря о применимости метода нельзя не отметить, что МСП не имеет конкурентов при исследованиях в зонах плотной застройки и гористой местности, когда доступ к поверхности затруднен или невозможен. Благодаря действительно высокой разрешающей способности во всем диапазоне глубин исследуемого объекта, МСП позволяет эффективно решать такие задачи, как выявление зон «непроливов» и зон разуплотнения стены в грунте, выполнение контроля качества инъекционных работ, определение состояния ледопородного ограждения, обнаружение карстовых проявлений на больших глубинах и, при реализации многоволновых наблюдений, детального изучения физико-механических свойств исследуемого объекта. Важной особенностью метода является отсутствие каких-либо требований к типу модели среды, а следовательно, МСП с успехом может применяться как на горизонтально-слоистом разрезе, так и на разрезах с геологическими телами произвольной формы. Все это определяет МСП как эффективный метод городской геофизики, геофизики на особо ответственных объектах, как один из методов рудной геофизики.

Краткий обзор рынка современных аппаратных и программных решений для производства МСП.

Среди зарубежных производителей, серийно выпускающих аппаратуру для МСП и малоглубинного ВСП, стоит отметить «Geotomographie» (Германия), «SOLGEO» (Италия), «Geostuff» (США),

«PASI» (Италия) и «Geometrics» (США). Несмотря на небольшой список производителей, далеко не все предлагают полный комплекс оборудования. Например «Geostuff» предлагает примитивные одноточечные аналоговые ЗС зонды, «GeospaceTechnologies» и «Sercel» предлагают телеметрические ЗС одноточечные и многоточечные системы регистрации, «PASI» рекламирует ЗС зонды и малоэффективные механические скважинные молоты, позволяющие генерировать SV волну, а «Geometrics» и вовсе поставляет только скважинные гидрофонные косы. От своих конкурентов выгодно отличается компания «Geotomographie», которая производит полный комплекс разнообразного оборудования, начиная от накопителей энергии с излучателями Р и SH волн, до разнообразных, в том числе многоточечных, ЗС зондов и гидрофонных кос.

Из отечественных производителей необходимо выделить компании «ГЕО-СИГНАЛ» (г.Москва), «СибГеофизПрибор» (г.Новосибирск) и «ГЕОДЕВАЙС» (г.Санкт-Петербург). Первые 2 производителя предлагают высококачественные сейсмостанции и телеметрические одноточечные скважинные ЗС зонды ТЕЛСС-ВСП и SGD-SLMGNOME, соответственно. Компания «ГЕОДЕВАЙС» выпускает компактные накопители энергии Jack с линейкой сейсморазведочных излучателей Pulse, SVat и Shock для генерации, соответственно, Р, SV и SH волн в скважинах, многоточечные ЗС зонды и гидрофонные косы.

Наиболее известные и популярные программные реализации томографической инверсии: ZondST2d и ZondST3d («ZondSoftware», г. Санкт-Петербург), FirsTomo и XTomo-LM (X-geo», г. Санкт-Петербург), TOMOXpro (GeoTomo, США) и Reflexw (Sandmeie geophysical research, Германия).

Подготовка скважин к проведению МСП.

Качество данных МСП напрямую зависит от конструкции используемых в работе скважин, поскольку в основном именно конструкцией и определяется качество акустического и механического контакта излучателя и приемника с исследуемой средой. Если скважины располагаются в плотных коренных породах или бетонных массивах сооружений, обсадку скважин необходимо производить при выполнении двух условий: проведение работ планируется с использованием спаркера и/или гидрофонных кос; наблюдается сильная утечка воды в трещиноватых интервалах пород. Обсадку следует выполнять только полиэтиленовыми трубами, в которых скорости распространения упругих волн близки к скоростям вмещающих пород. Применение стальной обсадки ведет к появлению определенных сложностей в обработке сейсмических записей, обусловленных искажающим влиянием колонны труб, по которым с высокой скоростью распространяются акустические волны. Особенно существенны эти искажения в случае, если сигнал от излучателя подходит к приемнику под значительным углом. Важно понимать, что искажения, связанные с высокоскоростными трубными волнами возникают в скважинах, используемых для размещения как излучателей, так и приемников. В некоторых случаях для выполнения межскважинного просвечивания необходимо производить цементирование затрубного пространства. Основные требования и технологии подготовки скважин к выполнению МСП подробно описаны в стандарте ASTM D 4428/D 4428M.

Однолучевое параллельное просвечивание.

По стандарту ASTM D 4428/D 4428M параллельное просвечивание выполняет-

ся в скважинах, разнесенных друг от друга на дистанцию от 3 до 6 метров.

Подразумевается, что на столь малом расстоянии возможным отклонением лучевых траекторий от кратчайшего расстояния между источником и приемником можно пренебречь. Тем не менее, такой дистанции достаточно для «разбега» во времени первых вступлений Р-волн и пикировки фаз с относительно малым вкладом погрешности пикирования. Результатом параллельного просвечивания является вертикальное распределение скоростей V_p и/или V_s в межскважинном пространстве.

Аппаратурное обеспечение параллельного просвечивания на Р-волнах является относительно простым, поскольку геофизической группе достаточно иметь высокочастотную сейсмостанцию, легкую кабельную линию с одним согласованным с сейсморегистрирующим каналом гидрофонным модулем, регистрирующим изменение давления в точке измерения (Н-компонента), и комплект электроискрового источника, состоящего из накопителя энергии, высоковольтной кабельной линии с закрепленным на конце электроискровым излучателем – спаркером (рис.2).



▲ Рис. 2. Накопитель энергии Jack-1200 с подключенным пультом дистанционного управления JackPad и скважинный спаркер Pulse (производитель ООО «ГЕОДЕВАЙС»)

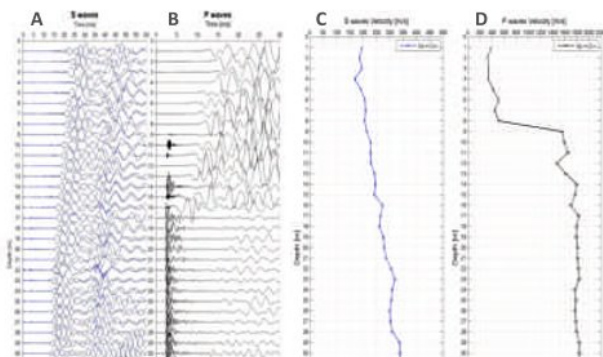
Задачей блока накопителя энергии является формирование короткого (первые микросекунды) высоковольтного (обычно 2.5-6 кВ) электрического импульса значительной энергии (обычно 0.5-2 кДж), обеспечивающего формирование ионизированных парогазовых полостей высокого давления [Владов М.Л., и др., Новые...] на электродной группе спаркера, как правило, помещенной в контейнер с соленой водой, низкое сопротивление которой обеспечивает исключительно стабильный электрический разряд, и, как следствие, стабильную сигнатуру источника (рис.3). При взрывном расширении парогазовой полости давление в ней резко падает, что приводит к резкому падению температуры, конденсации пара и последующему схлопыванию полости, которое не приводит к паразитным пульсациям.



▲ Рис. 3. Сменная электродная группа спаркера Pulse, подключенная к герметичному кабельному высоковольтному разъему (контейнер с соленой водой снят)



▲ Рис. 4. Оборудование для параллельного МСП (производитель «SOLGEO» Srl): А – высоковольтная кабельная линия с комплектом скважинных излучателей Р и SV волн «SPARKER» и «GEOS-H» соответственно; В – комплект сменных скважинных приемников с кабельной линией: прижимной трехкомпонентный геофонный зонд ATG-14 и гидрофонный модуль.



▲ Рис. 5. Данные параллельного МСП (дистанция 4 метра): А – сводная сейсмограмма (Z-компонента) просвечивания на S волнах – обращение фаз первых вступлений получено при генерации SV+ и SV- поляризации сигнала; В – сводная сейсмограмма (H-компонента) просвечивания на P волнах; С и D – вертикальное распределение скорости S и P волн, соответственно, в межскважинном пространстве.

Для параллельного просвечивания на S волнах используют скважинные прижимные электродинамические излучатели, позволяющие создавать разнополярные импульсы смещения в вертикальном направлении, тем самым возбуждая волны SV+ и SV- поляризации. Преимуществами использования SV-источника являются возможность регистрации сигнала компактным одноточечным прижимным геофонным зондом (рис.4), отсутствие необходимости ориентации оборудования в скважинах и простое выделение вступлений поперечных волн на вертикальной (Z) компоненте регистрации без применения поляризационного анализа (рис.5).

Томографическое просвечивание на продольных волнах.

Томографическое просвечивание подразумевает «плотное» и многоазимутальное покрытие исследуемой среды сейсмическими лучами. При выполнении данного вида работ в водонаполненных скважинах используют спаркеры и много-

канальные сейсмические косы с количеством приемных гидрофонных модулей до 24 штук и шагом между модулями в 1 или 2 метра (рис.6).



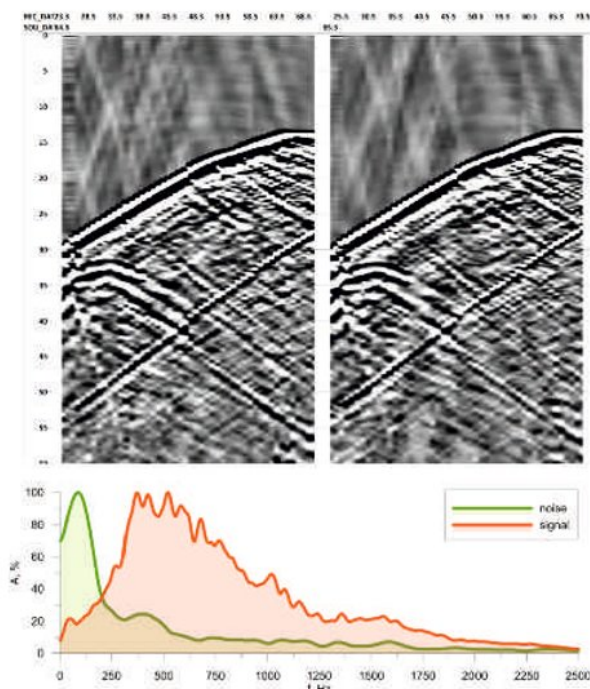
▲ Рис. 6. Скважинная гидрофонная 24-х канальная сейсмическая коса на катушке со скользящими контактами и батарейным блоком, обеспечивающим питание предварительных усилителей (производитель ООО «ГЕОДЕВАЙС»)

Использование приемной установки из одного или нескольких гидрофонных модулей возможно, но малоцелесообразно в виду значительного роста времени выполнения работ.

Использование спаркера и гидрофонной приемной установки достаточно выгодно по ряду причин:

- сферической диаграммы направленности излучателя и приемника;
- дешевизны скважинных снарядов, нивелирующей риск их потери при завалах ствола скважины;
- высокой частоты сигнала (сотни герц – 1-2 килогерца), обеспечивающей высокую разрешающую способность;
- высокой скорости полевой съемки;
- стабильного акустического контакта, позволяющего работать с кинематическими и динамическими характеристиками волнового поля.

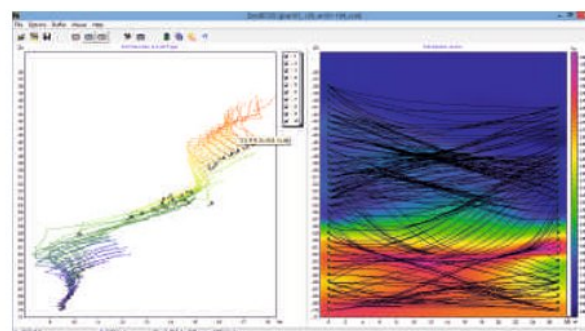
Крайне редко в данном виде работ применяют источники другого типа, такие как погружные скважинные сейсмичес-



▲ Рис. 7. Пример полевых данных МСП на Р волнах, полученных с использованием спаркера и гидрофонной приемной установки: вверху – сейсмограммы ОПВ, для двух положений ПВ; внизу – амплитудные спектры сигнала и шума, зарегистрированного до момента прихода волны.

кие ружья, использующие для генерации сигнала взрыв монтажного патрона, и малогабаритные малообъемные пневмопушки [Ragozin..., 2011]. Относительно редкое использование пневмоисточников обусловлено не только меньшим удобством и относительно низкой скоростью их работы по сравнению со спаркерами, но и наличием паразитных пульсаций в сигнатуре источника.

Поскольку наблюдения при производстве МСП проводятся ниже приповерхностного неоднородного слоя и на достаточно высоких частотах, негативное влияние шумов, обычно имеющих несколько меньший частотный диапазон, ограничено. При правильной постановке работ и грамотном подходе к получению данных, качество сейсмических записей в большинстве случаев является хорошим, с высоким значением соотношения сигнал/помеха.



▲ Рис. 8. Рабочее окно программы ZondST2d. Слева показано совпадение наблюдаемых и расчётных годографов, справа восстановленная скоростная модель с трассированием сейсмических лучей. В правой части известнякового основания выделяется карстовая полость, в левой части падение скорости вероятно связано с зоной разуплотнения.

Типичный пример данных, полученный на дистанции между скважинами в 25 метров в условиях песчано-глинистого разреза, имеет соотношение сигнал/шум в диапазоне 70-100 (рис.8). Амплитудно-частотный анализ записи показывает, что полезный сигнал (первые проходящие и отраженные Р-волны) находится в полосе частот 250 – 1100 Гц, а основная энергия шумовой составляющей лежит в диапазоне 0-200 Гц. Пикирование первых вступлений по таким данным для их последующей томографической обработки обычно не вызывает каких-либо затруднений.

Сейсмическая томографическая инверсия – метод восстановления характеристик по множеству пересекающих среду сейсмических лучей. Построение томографического изображения среды выполняется путем итерационного изменения модели начального приближения таким образом, чтобы минимизировались невязки между наблюдаемыми и рассчитанными по восстанавливаемой модели данными. Основные алгоритмы выполнения томографической инверсии описаны в [Ефимова, 2006; Сейсмическая ..., 1990; Болгаров... 2009; Тихоцкий и др., 2011]. Для получения качественного результата томографичес-

кой инверсии необходимо построить корректную начальную модель с распределением скорости, приближенно соответствующей скоростям в исследуемой среде, и задать правильную дискретизацию модели. Последующая тонкая настройка параметров регуляризации томографической инверсии позволяет восстановить корректное распределение скорости распространения упругих волн (рис.8), анизотропии скорости, декремента затухания и параметра чувствительности.

Многоволновое томографическое просвечивание.

Описанная выше методика выполнения томографического МСП на Р волнах обладает двумя принципиальными недостатками:

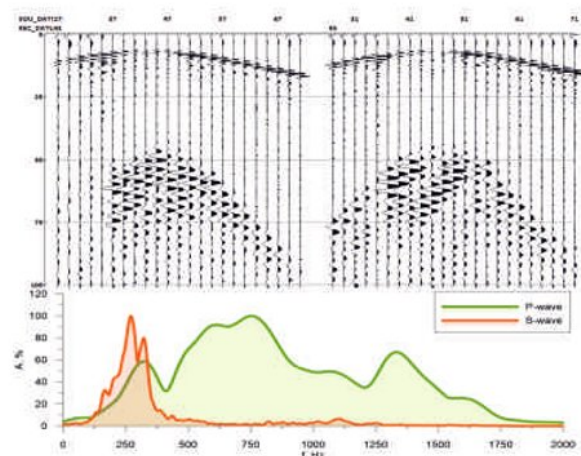
- возбуждение сигнала спаркером, скважинными пневмопушками или сейсмическими ружьями возможно только в водонаполненных скважинах;
- отсутствие поперечных (S) волн на получаемых сейсмических записях.

Данные проблемы успешно решаются с помощью применения излучателей продольных волн и поперечных волн SH поляризации, фиксируемых в скважине с помощью специальных прижимных устройств, и регистрации данных трехкомпонентными (3С) прижимными сейсмическими модулями, количество которых при производстве томографического МСП обычно составляет до 8 штук. Использование описанных выше SV излучателей в данном случае малоэффективно, поскольку максимум диаграммы направленности источников такого типа расположен в плоскости перпендикулярной оси скважины и амплитуды SV волны быстро уменьшаются с ростом угла возвышения.

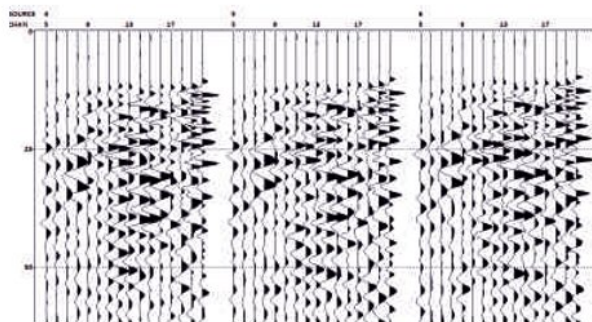
Необходимо сказать, что еще в работе [Пузырев, 1967] была показана способность помещенных в скважину источников

типа «центр расширения» возбуждать кроме Р волн и S волны SV поляризации, имеющие максимум в диаграмме направленности под углами 45° к оси скважины. В некоторых случаях оказывается, что из-за неоднородностей среды эти волны могут проследиваться в значительно большем диапазоне углов (рис.9). Однако использование связки из всенаправленного спаркера и 3С прижимных регистрирующих модулей лишь частично закрывает вопрос с регистрацией поперечных SV волн и, как показала практика авторов, надежных результатов удается достичь далеко не всегда. Часто SV волны, возбужденные таким образом, теряются в шуме, что не позволяет с уверенностью выделять их в общей волновой картине (рис. 10).

Наиболее известными излучателями S волн SH поляризации являются «BIS-SH» (производитель «Geotomographie») и «SHock» (производитель «ГЕОДЕВАЙС», рис. 11). Данные источники генерируют SH-волну за счёт удара бойком в одну из стенок скважины. Прижим бойка обеспечивается с помощью надуваемой камеры,



▲ Рис. 9. Пример исходных полевых данных при работах с 3С приемником и спаркером. Вверху – две сейсмограммы ОПВ, для двух положений ПВ. Внизу – спектры Р- и S-волн. Для возбуждения сигнала использовался накопитель «Jack» в комплекте с излучателем «Pulse». Регистрация данных велась прижимным телеметрическим 3С зондом «ТЕЛСС-ВСП».



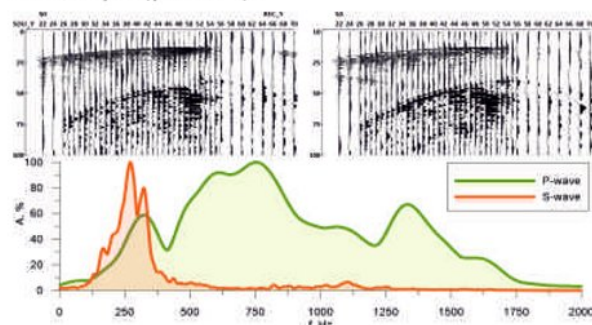
▲ Рис. 10. Пример отрицательного результата при работах с 3С прижимным приемником и всенаправленным спаркером. Аппаратура, система наблюдений и геологические условия те же, что и на рис. 9.

в которую через пневмоэлектрическую линию подается сжатый воздух с поверхности. Асимметричность удара достигается за счёт демпфирования сейсмического импульса тем же пневматическим прижимным устройством, выполняющим роль «глушителя» и существенным образом снижающим силу воздействия излучателя на противоположную стенку скважины. Создание возбуждений SH+ и SH- поляризации производится путем разворота излучателя в скважине с помощью вращения на дневной поверхности достаточно жесткой на скручивание пневмоэлектрической линии и выполнения серий ударов в противоположных друг-другу и одновременно перпендикулярных просвечиваемой плоскости направлениях.

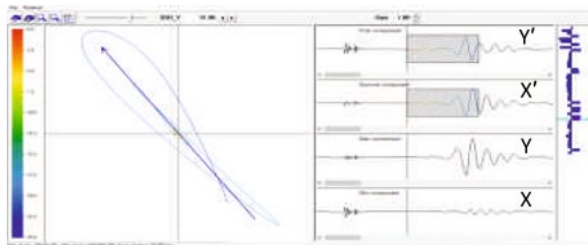


▲ Рис. 11. Скважинный излучатель поперечных волн SH поляризации Shock (производитель ООО «ГЕОДЕВАЙС»).

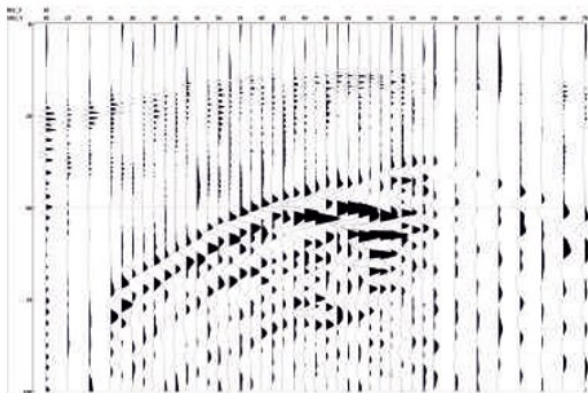
В отличие от SH источников, приемные 3С зонды обычно являются неориентируемыми, поскольку большинство из них опускаются в скважину на гибком и легко скручиваемом кабеле. Для преобразования «неориентированных» X'Y'Z' 3С записей (рис. 12) в ориентированные XYZ, где ось X горизонтальна и направлена на скважину с источником, Y горизонтальна и перпендикулярна X, а Z вертикальна и взаимно перпендикулярна X и Y, в заданном временном окне выполняется расчёт углов ориентации и производится ориентировка 3С записей. Окно расчёта должно включать вступления волны, по которой производится ориентировка, и включает ту часть записи, поляризация которой близка к линейной. Углы рассчитываются по матрице ковариации с определением собственных значений и векторов данной матрицы. Выполнение ориентировки сейсмических 3С записей от источника S волн SH поляризации позволяет собрать максимум энергии SH волны на Y компоненте (рис.13), а вычитание сейсмограмм от направленных в противоположные стороны возбуждений позволяет дополнительно увеличить соотношение сигнал/шум (рис.14).



▲ Рис. 12. Пример исходных полевых данных, полученных АО «Институт «Оргэнерго-строй» на площадке проектируемого размещения АЭС «Пакш-2» (Венгрия) при производстве работ с 3С приемником и источником поперечных волн Shock. Слева сверху сейсмограмма ОПВ для X компоненты, справа – Y. Произведено наложение ударов SH+ и SH-. Внизу спектры P и S волн. Расстояние между скважинами составляет около 25 м.

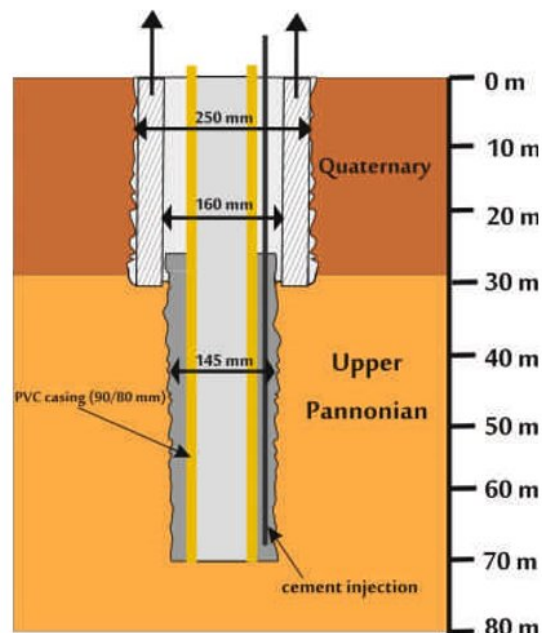


▲ Рис. 13. Иллюстрация процесса ориентировки сейсмической записи в плоскости XY в программе RadExProPlus. Слева – визуализация «траектории движения зонда», справа – сейсмические записи неориентированных (X' и Y') и ориентированных (X и Y) компонент записи.



▲ Рис. 14. Пример данных, приведенных на рис. 12 после ориентировки 3C записей и вычитания «правых» и «левых» ударов. Хорошо видно, что соотношение сигнал/шум SH волны резко возросло и уверенное выделение вступлений поперечной волны не представляет проблемы.

Данные, представленные на рисунках 12-14, получены в условиях геологического разреза, который до глубины 26 м представлен песчано-гравийными отложениями четвертичного возраста: в кровле – пылеватые пески, в подошве – пески гравелистые и гравийно галечные. Ниже залегают отложения формации Pannonia – очень плотные пылеватые пески с прослоями более крупнозернистых песков и глин. На рисунке 15 на фоне геологического разреза схематично показана конструкция скважин, использованных при проведении работ. На рисунках 12 и 14 хорошо



▲ Рис. 15. Пример конструкции скважин, использованных при проведении работ на площадке проектируемого размещения АЭС «Пакш-2» (пример данных представлен на рисунке 12). Нижняя часть скважины зацементирована, верхняя после удаления обсадной колонны засыпана песком.

видно, что поперечные волны регистрируются в интервале глубин 26-70 метров, т.е. в диапазоне цементации затрубного пространства, в то же время продольные Р-волны, хорошо видны во всем диапазоне глубин.

При подготовке скважин к производству многоволнового МСП необходимо обеспечить хороший механический контакт обсадной трубы с окружающей её горной породой. Самым надежным способом обеспечения такого контакта является цементация затрубного пространства, процесс выполнения которой достаточно подробно описан в стандарте ASTM D 4428/D 4428M. В редких случаях обсадная труба постепенно «обжимается» окружающими породами и регистрация S волн становится возможной без цементации – пример таких данных показан на рисунке 9, где разрез был представ-

лен переслаиванием песков и глин. В случае «подвисания», т.е. отсутствия надежного механического контакта обсадной трубы с окружающими породами, возможность выполнения работ на S-волнах полностью исключается.

Опыт авторов и приведенные в статье примеры данных, полученных при реализации многоволнового сейсмотомографического межскважинного просвечивания, показывают возможность успешного проведения работ и получения качественных данных на расстояниях до 25-35 метров между скважинами в условиях низкоскоростного разреза. Обработка таких материалов позволяет выполнить томографическую инверсию, получить распределение скоростей продольных и поперечных волн в исследуемой среде, рассчитать распределение динамических модулей упругости между скважинами, изучить и уточнить механические, петрофизические и геологические характеристики исследуемой среды, такие как предел прочности на сжатие, модуль деформации, трещиноватость, пористость, анизотропия и т.д.

Заключение.

Как показано в статье, метод МСП позволяет получить детальное распределение скоростей продольных (P) и поперечных (S) волн в межскважинном пространстве на всю глубину исследований. Данные такой детальности и достоверности невозможно получить используя другие методики, особенно если исследуемая среда находится под фундаментами действующих сооружений, а также в других случаях, когда проведение работ с поверхности невозможно, либо сильно затруднено. От распределения скоростей P и S волн можно легко перейти к пространственному распределению таких параметров как модуль сдвига, модуль Юнга, коэффициент Пуассона, напрямую используемых при проектировании сооружений. МСП не имеет альтернатив в поисках карстовых пустот на больших глубинах, зон трещиноватости и других аномалий, связанных с изменением физико-механических свойств массива горных пород, приводящих к появлению локальных аномалий скорости продольных или поперечных волн.

Периодическое выполнение МСП на одном и том же объекте с успехом может решать задачи мониторинга состояния массива горных пород. Особый интерес представляет задача оценки степени изменения свойств грунтов в основании зданий и сооружений в период эксплуатации, относительно их свойств до начала строительства. К таким объектам относятся в первую очередь сооружения энергетического комплекса (АЭС, ГЭС), высотного строительства и другие объекты повышенной ответственности и опасности.

МСП помогает в изучении вопроса улучшения сейсмических свойств грунтов путём создания свайного поля на площадках сложенных дисперсными и водонасыщенными грунтами. Проведение МСП до и после строительства свайного основания позволяет получить количественную оценку изменения сейсмических свойств, что особо актуально при строительстве на сейсмически активных территориях. Метод также может применяться с целью выполнения неразрушающего контроля таких этапов строительства, как создание стены в грунте, формирование ледопородного ограждения, выполнения инъекционных работ.

На рынке геофизических услуг основными заказчиками МСП являются органи-

зации занимающиеся проектированием и строительством объектов повышенной опасности и ответственности, такие как предприятия госкорпорации «Росатом», «Метрострой», «Мосметрострой», «Мос ИнжПроект» и другие.

Благодаря возможности изучения геологических тел произвольной формы, в том числе имеющих сложное внутреннее строение, метод также интересен компаниям занимающимся поиском и разведкой месторождений полезных ископаемых и анализом их состояния. У авторов статьи есть опыт выполнения межскважинного просвечивания на расстояниях более 100 м между скважинами на продольных (Р) волнах.

Приведенные в статье материалы наглядно демонстрируют современный уровень технологий в вопросах излучения и регистрации продольных и поперечных волн в межскважинном пространстве. На сегодняшний день в России доступен полный аппаратно-программный комплекс, предназначенный для решения самых сложных задач методом МСП.

Коллектив авторов отмечает и позитивно оценивает перспективность развития российского рынка межскважинного сейсмического просвечивания.

Литература

1. Болгаров А.Г., Рослов Ю.В. Межскважинная сейсмическая томография для решения инженерно-геологических задач / Технологии сейсморазведки. 2009. №1. С. 105-111.
2. Ефимова Е.А. Сейсмическая томография. / Москва, Изд-во МГУ, 2005.
3. Пузырев Н. Н. Поперечные и обменные волны в сейсморазведке. / Москва, Недра, 1967. 288 с.
4. Сейсмическая томография / Под ред. Г. Нолета. М.: Мир, 1990. 416 с.

5. Тихоцкий С. А., Фокин И. В., Шур Д. Ю. Активная лучевая сейсмическая томография с использованием адаптивной параметризации среды системой вэйвлет-функций / Физика Земли. 2011. № 4. С. 67–86.

6. ASTM D4428 / D4428M – 14. Standard Test Methods for Crosshole Seismic Testing. <https://www.astm.org/Standards/D4428.htm>.

7. Ragozin N.A, Mindel I.G, Trifonov B.A. Experience of borehole seismic surveys by method of reversed vertical seismic profiling. Extended abstract. Near Surface 2011 - the 17th European Meeting of Environmental and Engineering Geophysics, 12 - 14 September 2011, Leicester, United Kingdom.

8. Владов М.Л., Стручков В.А., Тихоцкий С.А., Фокин И.В., Шмурак Д.В. Новые лабораторные исследования электроискрового источника / конф. Сейсмические технологии 2016.