

От геологической задачи к конструированию методики МВС

Кузнецов В. М. ВНИИГеофизика, г. Москва

Выбор методики полевых работ МВС для решения различных геологических задач определяется спецификой этих задач, геологическими условиями проведения работ, особенностями волновых полей и основанных на них разведочных критериев, характерных для конкретного района исследований (рис. 1).

Очевидно, что для успешного решения



Рис. 1 Общие принципы построения методики МВС

структурных задач необходимо максимальным образом повысить разрешающую способность поперечных (обменных) волн. В основном это достигается оптимизацией условий возбуждения, хотя определенная доля успешного решения заключена в графе обработки. Для каждого района работ подбор этих компонент строго индивидуален и зависит от многих факторов.

Корректность решения литологических задач в значительной степени зависит от оптимального подбора комплекса скважинной и наземной сейсмики. В этом случае необходимо особое внимание уделить отождествлению волн разных типов одним и тем же геологическим объектам. Как и для структурных задач, для литологических также возможна двухкомпонентная регист-

рация (XZ или YZ).

Наиболее сложный подбор методических и технических средств характерен для текстурных задач. Исходя из особенностей волновых полей в анизотропных средах и разведочных критериев для конкретного района работ следует ориентироваться на основные критерии выбора методики МВС при изучении анизотропных (трещиноватых) объектов сводятся к следующему:

1) Вследствие необходимости изучения поляризации регистрируемых волн в пространстве сама регистрация должна быть **трехкомпонентной**.

2) Методика должна учитывать возможность управления направленностью при возбуждении и регистрации поскольку только на этой основе возможно изучение поляризации волн разных типов и параметров анизотропии (главных элементов симметрии) для конкретных объектов и решение по ним обратной задачи оценки ФЭС. Управление направленностью при возбуждении осуществляется на основе использования источников поперечных волн с заданной характеристикой направленности или подбором данных, получаемых в ортогональных лучевых плоскостях. В последнем случае приходится значительно усложнять системы наблюдений, снижается точность решения задач и усложняется обработка и интерпретация данных. Но это часто оправдано из-за дороговизны направленных источников или их отсутствия. Управление направленностью при возбуждении возможно осуществлять как в пространственном варианте - возбуждение в трех направлениях на каждом ПВ, так и в горизонтальной плоскости при возбуждении поперечных волн во взаимно перпендикулярных направлениях.

3) Использование в схемах наблюдений различной ориентации лучевых плоскостей и, на этой основе, определение пространственного в зависимости от угла подхода распределения скоростей, положения геологических объектов в пространстве и ориентации главных элементов симметрии среды. Методика может включать как отдельные точки подобных схем на площади

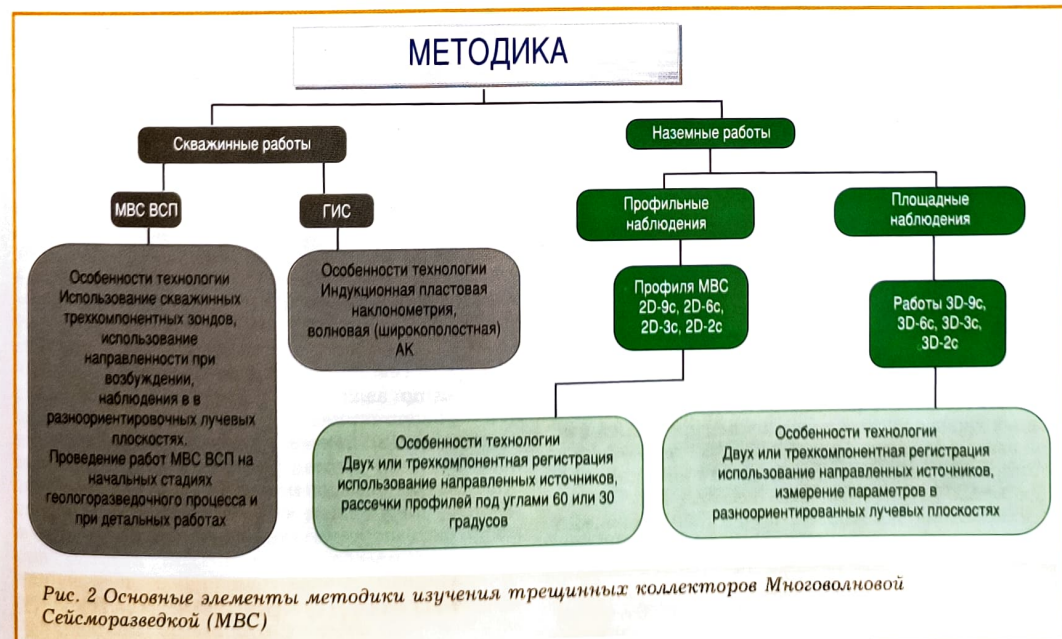
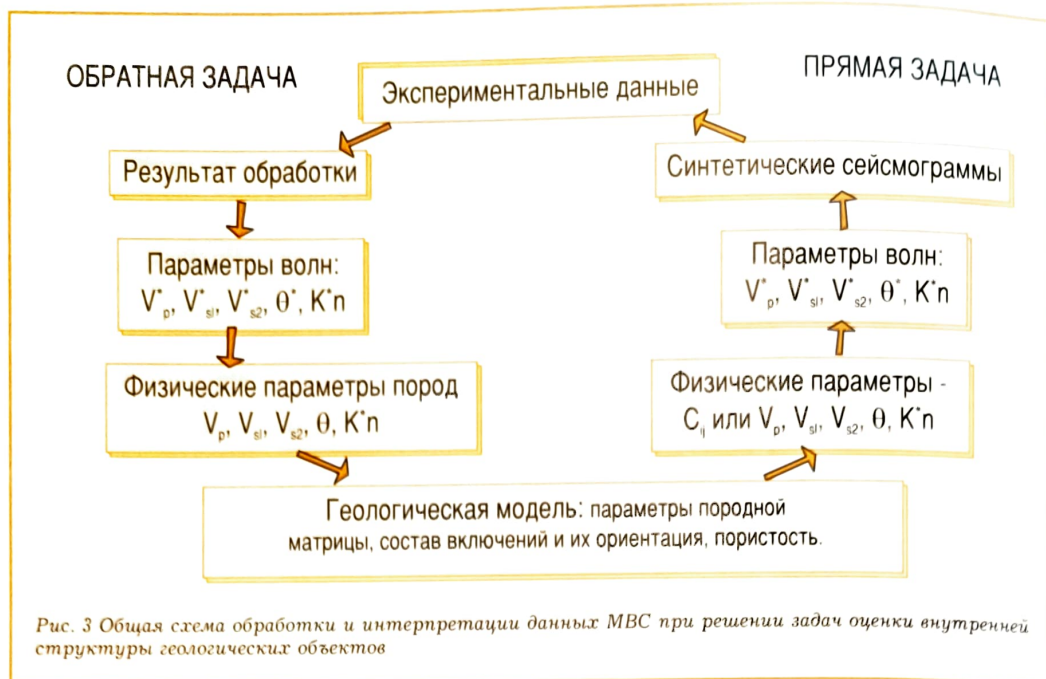
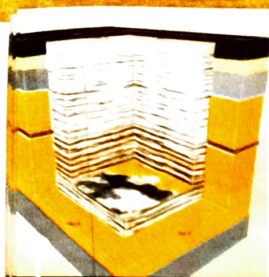


Рис. 2 Основные элементы методики изучения трещинных коллекторов Многоволновой Сейсморазведкой (МВС)



работ при слабых вариациях геологических факторов по латерали, так и равномерное распределение наблюдений в разном ориентированных лучевых плоскостях по площади.

При составлении технического проекта работ МВС следует учитывать особенности технических средств, которые могут быть использованы при данных работах (увеличение канальности станции, многокомпонентные регистрирующие системы, источники упругих колебаний и т.д.). Конкретная реализация методики определяет количество получаемой полезной информации, достоверность и надежность получаемых данных, поэтому главная задача выбора конкретной методики состоит в оптимизации соотношения возможности решения поставленных геологических задач и соответствующих расходов.

В частности, на основе факторов, которые вытекают из особенностей волновых полей волн разных типов в трещиноватых, а значит, анизотропных средах, строится методика изучения трещиноватых сред, основанная на комплексировании волн разных типов и оценке параметров сейсмической анизотропии (Рис. 2). Методика обнаружения и локализации по разрезу анизотропных (трещиноватых) интервалов, определения их физических свойств предполагает измерение скоростей распространения и динамических (включая поляризацию) характеристик продольных, обменных и разнополяризованных поперечных волн в различных направлениях в пространстве.

Важным моментом построения методики МВС является сочетание скважинных и наземных наблюдений. При этом рекомендуется на первом этапе работ проводить именно скважинные работы, чтобы на последующих этапах методика наземных наблюдений опиралась на результаты скважинных исследований.

Другой особенностью построения методики МВС является учет при проектировании работ результатов моделирования волновых полей волн разных типов с учетом разведочных критериев для целевых объектов разведки по имеющейся априорной геологической и геофизической информации. При этом, как показал наш опыт, моделирование должно быть пространственным с учетом анизотропии среды и реализовывать широкий круг схем наблюдений (ВСП, НВСП, круговые и криволинейные профили и т.д.). Впоследствии, на всех этапах обработки и интерпретации, заложенная геологическая модель

модифицируется и дополняется - параллельно осуществляется решение прямой и обратной задачи с сопоставлением их результатов. В этом заключается структурно-формационный подход, используемый нами в МВПС (рис. 3).

Как видно, уже на этапе проектирования работ МВС следует учитывать отдельные особенности этого метода и именно на этом этапе закладывается возможность корректного решения поставленной геологической задачи.

Остановимся подробнее на отдельных элементах методики.

Многокомпонентная регистрация.

Многокомпонентная регистрация помимо возможности регистрировать информацию о всей совокупности волн позволяет управлять направленностью приемной установки на основе направленности I-го рода и, таким образом, оптимизировать изучение характеристик волн с той или иной поляризацией. Действительно, анизотропные среды характеризуются отклонением вектора поляризации волн P и SV от лучевой плоскости, поляризация поперечных и обменных волн в горизонтальной плоскости достаточно сложна - существуют как радиальные так и тангенциальные компоненты поля независимо от направленности используемых источников. Соответственно, чтобы оценить параметры изменения поляризации в пространстве, необходима трехкомпонентная регистрация.

В настоящее время используются различные виды многокомпонентной регистрации. Это регистрация двух- и трехкомпонентными установками XY и XYZ, связанными с декартовой системой координат, а также трех или четырехкомпонентная (четвертая компонента - контрольная) симметричная азимутальная установка I II III, предложенная Е.И. Гальпериним, с углами наклона осей максимальной чувствительности сейсмоприемников с вертикалью 54° 40' и шагом по азимуту между компонентами 120°, что обеспечивает ортогональность между компонентами. Реже в отдельных работах используются другие установки с той или иной ориентацией компонент. Следует отметить, что данные, полученные с любым типом установки, могут быть пересчитаны в любую другую путем несложных преобразований:

$$F(t) = \alpha A_I(t) + \beta A_{II}(t) + \gamma A_{III}(t) \quad \{1\}$$

где $A_{\dots}$ - амплитуда соответствующей компоненты, α , β , и γ - направляющие косинусы углов между направлениями I, II, III, соответственно и направлением в пространстве.

Важным моментом здесь является идентичность отдельных компонент установки по всем характеристикам сейсмического канала и точное знание их ориентации. Волновое поле должно быть максимально точно зарегистрировано по всем пространственным компонентам без подавления и искажения каких-либо составляющих. Любые виды селекции и подавления могут применяться только на этапе обработки, поскольку заранее не известна ориентация поляризации полезных компонент и она может меняться по laterali.

С точки зрения возможностей последующей количественной интерпретации принципиального преимущества одного типа регистрации над другим нет. Единственно, что более привычны для анализа компоненты, привязанные к глобальной или локальной декартовой системе координат. В этом смысле очевидно преимущество установок XYZ (при условии идентичности их компонент). В то же время пока недостаточно изучены в реальных условиях частотные и фазовые искажения всего тракта, включающего корпус прибора, его контакт со средой и многое другое. В связи с этим нельзя все компоненты считать абсолютно идентичными. В этих условиях пересчет компонент также может являться источником некоторых дополнительных ошибок. Учитывая, что широко используемые в МВС поперечные волны поляризованы преимущественно в горизонтальной плоскости, можно отдать предпочтение установке X, Y, Z. Это, в частности, помогает оперативному контролю качества получаемых материалов, оперативному анализу волновых полей и принятию решения о коррекции системы наблюдений непосредственно в ходе полевых работ.

Особенности возбуждения упругих колебаний при работах МВПС.

Методика возбуждения волн при работах МВПС, по большей части, основана на принципах управления направленностью в источнике (направленность I рода) и оптимизации возбуждения волн разных типов.

В основе методики многоволновой сейсморазведки лежит оптимальное для каждого из используемых типов волн возбуждение колебаний - использование ненаправленных источников при возбуждении продольных волн, и источников с искусственной управляемой направленностью при возбуждении монотипных поперечных волн. Среди первых доминируют взрывные и вибрационные источники. Горизонтальные вибраторы в силу их хорошей стабильности и технологичности изменения направленности, при работах ВСП использовать предпочтительней. Взрывные направленные источники (взрывы с предварительно созданными камуфлетами и др.) при работах ВСП менее предпочтительны в силу изменения условий возбуждения и характеристики направленности при многократном использовании одной скважины, хотя при наземных работах при соответствующих условиях они успешно могут применяться для направленного возбуждения.

Использование направленности источников различных типов нашло широкое применение для решения различных геологических задач. Многочисленные исследования, посвященные этой проблеме, подтвердили достаточную эффективность возбуждения поперечных волн заданной поляризации при достаточно высоком соотношении сигнал/помеха. В настоящее время при работах ВСП и 2D или 3D используют возбуждение поперечных волн с поляризацией, лежащей в лучевой плоскости (X- возбуждение) и ортогонально лучевой плоскости (Y- возбуж-

дение). При изучении анизотропных свойств разреза используются также "косые" воздействия, обладающие направленностью под углом, отличным от 90 (как правило, 45) к лучевой плоскости.

Изменение направления действия силы приводит к соответствующему повороту характеристики направленности. В случае действия в точке ряда сил характеристика направленности согласуется с равнодействующей этой системы сил. Это позволяет сделать вывод о том, что, манипулируя направлением равнодействующей силы, можно получать требуемые характеристики направленности, управляя тем самым поляризацией излучаемых колебаний.

Комбинация волновых полей, полученных при ортогонально направленных источниках, позволяет реализовать источник с любой заданной направленностью:

$$A_{\delta}^{\gamma} = A_{\delta}^{\beta} \cos(\gamma - \beta) - A_{\delta}^{\beta-90} \sin(\gamma - \beta) \quad (2)$$

где A_{δ}^{β} и $A_{\delta}^{\beta-90}$ - горизонтальная компонента регистрации волнового поля с азимутом δ , полученная при воздействии горизонтальной силы в азимуте β и ортогональном ему азимуте соответственно, A_{δ}^{γ} - горизонтальная компонента регистрации волнового поля с азимутом δ , полученная при воздействии горизонтальной силы в азимуте γ .

В случае отсутствия возможности использовать специальные направленные источники, соответствующие характеристики волнового поля оцениваются по обменным и монотипным поперечным волнам, образующимся за счет естественной направленности среды в области источника (волны ЕН). Для надежной регистрации обменных волн достаточной интенсивности обычно следует использовать источники повышенной (в 2-2,5 раза) мощности, чем при регистрации только продольных волн.

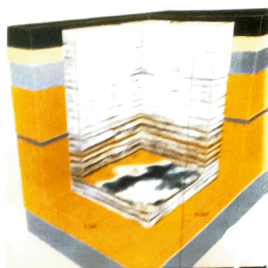
Дальнейшая интеграция систем наблюдений волн разных типов делает желательной и интеграцию систем возбуждения. Таким интегрированным источником мог бы быть источник, реализующий наклонные воздействия в трех разных азимутах, которые при обработке могли бы быть пересчитаны в три любые другие воздействия, например Z, X, Y. Первые разработки таких источников уже существуют. Угол с горизонталью таких наклонных источников в принципе не имеет большого значения. Наиболее удобно для пересчета иметь ортогональную установку с углами наклона от горизонтали около 35° от горизонтали. В то же время конструктивно и по передаче энергии поперечных составляющих возможно более удобно иметь угол в 45°, однако такая схема пока не проверена экспериментально.

При работах на акваториях естественно применение ненаправленных воздействий. Однако для более эффективного использования поперечных волн, формирующихся в придонных слоях, целесообразно регулировать частотный спектр возбуждающихся колебаний так, чтобы в нем заведомо присутствовали относительно низкие частоты, соответствующие спектру поперечных волн от ЕН. Для этого, в частности, возможно группирование источников с временными задержками, а также группирование источников на базах, соответствующих параметрам поперечных волн.

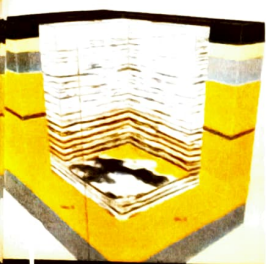
Схемы наблюдений.

На основании особенностей волновых полей волн разных типов в типичных трещиноватых средах рекомендуется строить методику наблюдений таким образом, чтобы регистрировались данные по вертикальному направлению и разноориентированным по азимуту наклонным направлениям.

Для МВПС-ВСП, (МВПС - поляризационная



Многоволновая сейсморазведка Геофизические технологии



модификация МВС) поскольку изучаемые модели характеризуются анизотропией, элементы симметрии которой всегда ортогональны, предпочтение следует отдавать ориентации выносных ПВ в азимутах, отличающихся друг от друга не на 90° , как это часто практикуется, а на 60° или 120° . Это связано с тем, что наблюдения в ортогональных лучевых плоскостях, которые при выборе системы наблюдений в районе, где симметрия среды заранее не известна, могут случайно совпасть по ориентации с главными элементами симметрии. В этом случае ортогональная система наблюдений не позволит оценить тип и степень анизотропии среды, а также получить волны, претерпевающие акт обмена на границах анизотропного интервала в лучевой плоскости, не содержащей главных элементов симметрии среды. Поскольку ориентация главных элементов симметрии заранее не известна, требуется такая ориентация лучевых плоскостей, которая позволила бы одной из них отличаться от ориентации главного элемента. С другой стороны, в отсутствии при работах направленных источников, следует предусматривать в схеме один выносной ПВ, ортогональный по азимуту любому другому выносному ПВ. Это необходимо для последующей реализации лабораторного управления направленностью возбуждения.

Обобщенная схема наблюдений, реализующая регистрацию данных МВПС-ВСП на вертикальном и наклонных лучах при скважинных работах, приведена на рис. 4.

Параметры систем наблюдений могут упрощаться или усложняться в зависимости от решаемой задачи и условий работ. Полную схему наблюдений, изображенную на рисунке, целесообразно использовать лишь в случае достаточно сложных сред с орторомбической симметрией (наложение различно ориентированных систем включений) и наличием углов наклона границ. В случае предположения о наличии только вертикальных трещин рекомендуется использовать ортогональные направленные воздействия только на ближнем ПВ. Для сред с ортотропным типом симметрии при значительных мощностях анизотропных покрывающих интервалов (например - глинистый разрез) на выносных ПВ можно использовать так называемые "косые" воздействия (под 45° к лучевым плоскостям), так как в этом случае разно поляризованные волны при подходе к точке регистрации имеют уже значительную разнесенность.

Приведенная схема позволяет реализовать наблюдения разно поляризованных волн разных типов на вертикальном луче (ближний ПВ) и наклонных разно ориентированных по азимуту лучах. Выносные ПВ дают возможность корректно провести ориентацию скважинного прибора по первой проходящей продольной волне в области ее линейной поляризации, так как на них горизонтальные компоненты Р-волны имеют уже значительные амплитуды. При этом контроль над качеством ориентации осуществляется путем сопоставления углов ориентации, полученных с разных ПВ. Когда поляризация уже в первых вступлениях приобретает значительную эллиптичность, ошибки при последующей реориентации компонент могут достигать 30° и более. В этом случае выбирается угол ориентации по ПВ с меньшей эллиптичностью первой продольной волны. Контроль за правильностью ориентации приборов в скважине может делаться также по поляризации регистрируемых на вертикальном профиле поперечных и обменных волн. Это может позволить исключить грубые ошибки в ориентации. Кроме того, для выносных ПВ характерно наличие более интенсивных обменных волн и волн ЕН, которые впоследствии также могут быть использованы для оценки

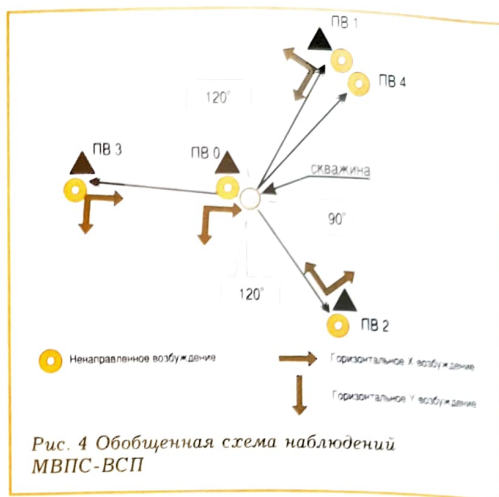


Рис. 4 Обобщенная схема наблюдений МВПС-ВСП

параметров анизотропии. Наблюдения с выносных ПВ необходимы также для определения коэффициентов анизотропии по волнам разных типов в разных лучевых плоскостях.

При работах по изучению азимутальной анизотропии (объект исследований характеризуется вертикальной трещиноватостью) пункты возбуждения с источниками, обладающими управляемой горизонтальной направленностью, целесообразно располагать вблизи устья вертикальной скважины или проекции предполагаемого анизотропного интервала на дневную поверхность при наклонной скважине. Таким образом, распространение поперечных волн заданной поляризации осуществляется по вертикальному лучу.

Выносные пункты возбуждения располагаются на удалении от скважины достаточном для получения на исследуемом интервале интенсивных горизонтальных компонент первой продольной волны, что важно для последующей ориентации компонент скважинного зонда. При этом следует исходить из того, что углы подхода первой проходящей продольной волны составляют $10-40^\circ$. Большие выносы приводят к тому, что значительная часть энергии продольной волны переходит на горизонтальные компоненты, что осложняет корректную ориентацию, и для верхних интервалов в первые вступления выходят преломленные волны, что делает для них ориентировку невозможной. Мы рекомендуем в зависимости от типа разреза использовать удаления выносных ПВ от $1/3$ до $2/3$ глубины исследований.

Для изучения скорости распространения волн разных типов на наклонных лучах и коэффициентов анизотропии иногда целесообразно проводить работы методом обращенного географа (МОГ) и НВСП с источниками, обладающими горизонтальной направленностью. При этом, в зависимости от мощности исследуемого объекта, следует выбирать несколько уровней МОГ в исследуемом интервале и один уровень на его кровле. Шаг между пунктами возбуждения рекомендуется таким, чтобы обеспечить прирост угла подхода волны $5^\circ-10^\circ$. Возбуждение разнонаправленное взаимно ортогональное с целью последующей реализации любой требуемой направленности. Ориентацию профилей МОГ целесообразно делать под углом 60° , но только не 90° , чтобы избежать совпадения азимутов хотя бы одной из лучевых плоскостей с элементами симметрии. Если имеются сведения об ориентации главных элементов среды, обладающей азимутальной анизотропией, один из профилей рекомендуется ориентировать в азимуте, совпадающем с одним из главных элементов, что в значительной степени упрощает решение задачи и повышает точность результата.

При наземных наблюдениях схемы для реализации методики МВС предусматривают профильную (2D- 2С, 3С, 6С или 9С) и пространственную систему при двух- или трехкомпонентной регистрации и одно-трехкомпонентном возбуждении (3D-2С, 3С, 6С или 9С).

Конкретные параметры данных систем - расстояние между линиями возбуждения и приема, параметры группирования многокомпонентных регистраторов и источников упругих колебаний разных типов и т.д., зависят от требований детальности исследований, формулируемых геологической задачей, геологических и геофизических особенностей района работ, его орогидрографией и агропромышленной ситуацией и т.д. Наиболее полные схемы позволяют помимо задач пространственных структурных построений по волнам разных типов и оценки изменения литологического состава исследуемых геологических объектов получать информацию о пространственном распределении скоростей волн разных типов за счет выборки трасс для заданного бина при различной ориентации лучевых плоскостей с реализацией управления направленностью как в источнике, так и на приеме.

Схема 3D-9С достаточно сложна как при проектировании, так и при проведении полевых работ в силу сложности организации взаимодействия источников разных типов, многоканальности регистрирующей аппаратуры и т.д. Поэтому использование ее целесообразно лишь в случаях требования высокой детальности и достоверности изучения трещинных коллекторов на стадиях разведки на уже открытых месторождениях.

При решении более простых геологических задач, связанных, например, только с обнаружением существования трещиноватых интервалов в изучаемом геологическом разрезе, локализацией их существования в разрезе и по площади, или только определения преимущественной ориентации систем трещин на изучаемой площади и так далее, системы наземных наблюдений могут быть существенно упрощены.

Упрощение схемы возможно как за счет отказа от систем пространственных систем наблюдений, так и путем отказа от использования некоторых типов источников на отдельных (или даже на всех) профилях например, наблюдения только на продольных и обменных волнах с ненаправленным источником при трехкомпонентной регистрации - 3D-3С. В этом случае отсутствует возможность управлять поляризацией волн в источнике.

Такие же упрощенные схемы соответствуют методике использования направленных источников либо только SV (X-возбуждение), либо только SH(Y-возбуждение). В случае использования только монотипных поперечных волн и волн $P_{\text{н}}$ (ЕН - естественная направленность) при двухкомпонентном ортогональном (X,Y) горизонтальном возбуждении получается схема 3D-6С. В этом варианте есть возможность управлять направленностью при возбуждении в горизонтальной плоскости, но информацию о характеристиках продольных волн можно получить (при условии их достаточной интенсивности) только по волнам $P_{\text{н}}$ и обменным типа SP.

Другим вариантом упрощения схемы может быть отказ от отдельных компонент регистрации. Однако следует заметить, что при изучении анизотропных сред поляризация поперечных и обменных волн в горизонтальной плоскости достаточно сложна - существуют как радиальные, так и тангенциальные компоненты поля независимо от направленности используемых источников. В соответствии с этим для задачи изучения трещиноватых сред можно считать обязательной как минимум двухкомпонентную в горизонтальной плоскости регистрацию.

Двухкомпонентная в горизонтальной плоскос-

ти регистрации также оказывается наиболее целесообразной из-за того, что пересчеты компонент в лучевые и трансверсальные плоскости в этом случае наиболее просты. Наибольшие проблемы в этом случае возникают с изменениями базы группирования при существенных изменениях направлений лучевых плоскостей.

В случае пространственных систем наблюдений следует учитывать особенности волновых полей для источников с поперечным выносом и лучевых плоскостей, не совпадающих с плоскостью профиля. При значительных поперечных выносах наблюдаются существенные изменения поляризации регистрируемых волн: у отраженных продольных волн появляется заметная тангенциальная компонента, а у обменных такая компонента появляется даже при малых расстояниях ПП-ПВ. Тангенциальная компонента может быть в данном случае иногда даже доминирующей. В связи с этим необходимой процедурой обработки данных пространственных многоволновых наблюдений является пересчет компонент регистрируемых волн.

В качестве более простых систем пространственных многоволновых наблюдений можно предложить сочетание площадных систем для продольных волн (3D) и профильных наблюдений поперечных, продольных и обменных волн (2D-9С, 2D-6С, 2D-3С). При этом наиболее эффективно, чтобы профили 2D были бы ориентированы в нескольких направлениях и не были ортогональными (как уже отмечалось, углы между ними должны различаться в 60 или 120°). Регистрация при таких работах 2D рекомендуется как правило трехкомпонентная.

При рекогносцировочных работах могут применяться и более простые системы наблюдений волн разных типов. Главное при этом состоит в том, что для выявления наличия анизотропии в разрезе обязательно нужно изучать поляризацию волн, которые приходят к дневной поверхности как поперечные. Возможно сочетание на единой площади различных систем наблюдений, когда более полные системы используются в качестве опорных для более простых.

Как один из вариантов применения МВПС для изучения трещиноватых коллекторов на локальных площадях может рассматриваться, в частности, сочетание площадных систем наблюдений 3D только с регистрацией продольных волн с наблюдениями волн разных типов в одной или нескольких глубоких скважинах (МВПС-ВСП) на данной площади. В этом случае основные проявления трещиноватости изучаются по скважинным наблюдениям, а затем прослеживаются по площади по продольным волнам. Такая система наблюдений может позволить существенно упростить весь цикл работ и может затем усложняться по мере решения поставленных геологических задач.

При работах с использованием обменных волн рекомендуется предусмотреть увеличение кратности суммирования, так как при оптимизации суммирования для обменных волн выборки трасс СГТ предусматривают учет не симметрии луча для них, что может привести к снижению кратности. Максимальный вынос по сравнению со стандартными для данного района работами может быть увеличен, поскольку коэффициенты обмена для отраженных волн могут достигать значимых величин при больших удалениях ПВ-ПП.

Опыт показывает, что время регистрации при работах МВПС должно учитывать максимально возможное время регистрации отраженных от целевых горизонтов монотипных поперечных или обменных (если работы ведутся с комплексированием только продольных и обменных) волн с учетом выноса, углов наклона и возможной анизотропии.

Многоволновая сейсморазведка Геофизические технологии