

Построение геофизической модели трещиноватого коллектора по данным сейсморазведки

А.Г. Авербух

д.т.н., ведущий специалист¹
inpres@cge.ru

С.Ю. Граф

к.ф.-м.н., доцент. каф. математического анализа², инженер¹
Sergey.Graf@tversu.ru

Э.Р. Ахметова

программист, инженер¹

А.В. Гарнов

программист, инженер¹

¹АО «ЦГЭ», Москва, Россия

²Тверской государственный университет, Тверь, Россия

На протяжении последнего десятилетия неуклонно возрастает значение изучения трещиноватых пород, особенно коллекторов. Выявление трещиноватых зон и оценка их параметров становятся необходимыми для сейсморазведки. При этом существенные затруднения при определении трещиноватости связаны с неоднозначностью интерпретации. В связи с этим особое значение приобретает осознанный подход к выбору геофизической модели и методики интерпретации. Основная цель предлагаемой статьи заключается в выявлении комплекса диагностических признаков и устойчиво определяемых физических параметров трещиноватости, позволяющих выбрать эффективную модель среды и избежать заведомо нереалистичных вариантов интерпретации волнового поля.

Материалы и методы

Методы теории эффективных сред, сейсмическая инверсия.

Ключевые слова

трещиноватый коллектор, эффективная модель среды, сейсмическая интерпретация

Особенности построения эффективных моделей трещиноватых сред

Верификация построенной геологической модели производится средствами математического моделирования кинематических и динамических эффектов волновой картины, обусловленных наличием трещин в среде. Такое моделирование целесообразно и оправданно даже при наличии каротажных данных, поскольку адекватно представляет частотный состав и особенности реальной волновой картины. Учитывая тот факт, что раскрытость трещин пренебрежимо мала по сравнению с длиной сейсмической волны, в задачах сейсморазведки достаточно ограничиться теми моделями, в которых трещиноватые среды подменяются эквивалентными им в низкочастотном приближении эффективными средами. В настоящее время теория эффективных сред представляет собой хорошо разработанный инструмент описания геологических сред [1–5]. Тем не менее, на практике использование существующих методик определения эффективных параметров трещиноватости осложнено низкой помехоустойчивостью и неочевидной связью физической модели трещиноватой среды с сейсмическими характеристиками. Во многих случаях доминирует подход, при котором эффективная модель трещиноватого пласта строится исключительно на основании азимутальных вариаций AVO параметров, либо на корректировке изотропной акустической модели путем внесения в нее анизотропных эффектов, компенсирующих недоспряменности годографов или скоростные аномалии, в частности, с помощью распространенной системы параметров Томсена [6]. В обеих ситуациях существует риск, что полученная эффективная модель характеризует не собственно анизотропные свойства

трещиноватой породы, но является следствием анизотропных особенностей или низкого качества сейсмической записи.

Методология использования данных 3D сейсморазведки

Зачастую построение эффективной модели трещиноватой среды приходится производить в условиях, когда какая-либо информация о трещиноватости пород в целевом интервале разреза отсутствует. Можно лишь предположить, что имеющиеся на площади дизъюнктивные подвижки и иные деформации способствовали возникновению трещин, особенно в более хрупкой части среды.

Безусловным фактом является то, что трещиноватость среды приводит к повышению фона рассеянных колебаний, заметному снижению скоростей, а при однонаправленных трещинах и доминирующей ориентации трещин — еще и к заметной азимутальной анизотропии скоростей, которые меняются в зависимости от угла между простиранием трещин и направлением распространения волны.

Диагностическими признаками наличия трещиноватости можно считать повышение фона рассеянной энергии, азимутальные аномалии скоростной модели и (особенно) характерный для трещиноватых зон эффект расщепления (поляризации) поперечной волны (рис. 1). Однако, рассеянная компонента волнового поля существенно искажается и ослабляется при типовой обработке сейсмических материалов, а анализ поперечных волн в практике сейсморазведки применяется пока предельно редко. Наиболее приемлемой помехоустойчивостью и чувствительностью к трещиноватости обладают изменения свойств отраженных продольных (квазипродольных) волн, особенно на больших (свыше 1,5 глубин залегания) расстояниях (рис. 2, модель на рис. 3).

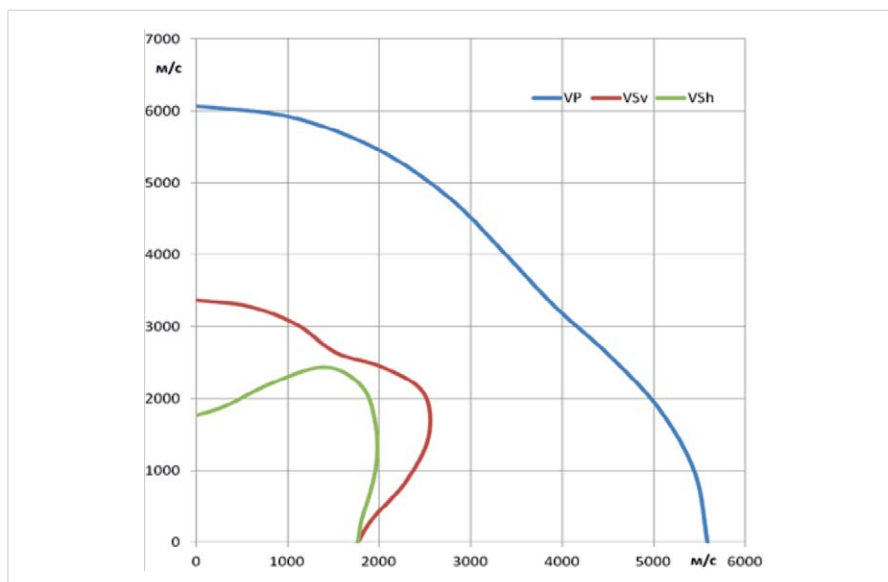


Рис. 1 — Азимутальные индикатрисы скоростей распространения упругих волн в трещиноватой среде

Выбор набора сейсмических параметров, характеризующих трещиноватую среду, определяется свойствами эффективной модели. Наиболее естественными и удобными являются параметры, эквивалентные физическим характеристикам трещиноватой среды: акустические свойства вмещающей породы, заполнителя трещин и геометрические характеристики системы трещин (форма, раскрытость, доля объема, занимаемого трещинами — плотность трещин).

Раскрытость трещин может варьироваться в значительных пределах: от сотых долей миллиметра для микротрещин до нескольких миллиметров для макротрещин.

В естественных условиях трещины занимают малый объем в породе (доли процента, редко до 1–2%) и потому незначительно меняют плотность вещества. Вместе с тем, появление трещин существенно меняет прочность породы, и, следовательно, модули упругости и значения продольных и поперечных скоростей. Расчет эффективных свойств трещиноватой среды выполняется путем объемного усреднения упругих характеристик локального объема сплошной среды, содержащего заполненное флюидом одиночное включение. При этом упругие свойства флюида (Vp_f, p_f) во включении (трещине) соответствуют свойствам воды, нефти, газа либо другого заполнителя; упругие свойства окружающей трещину среды (Vp_m, Vs_m, ρ_m) соответствуют данным в сплошном массиве породы. Методик объемного усреднения существует несколько. Одной из удобных, с точки зрения близости определяющих параметров модели к физическим, является метод, основанный на решении Дж. Эшелби [7] для эллипсоидального включения в изотропную среду и теоретически обоснованный в работах Т.Д. Шермергора [8], а впоследствии И.О. Баяк [9]. При этом форма каждой из идентичных эллипсоидных трещин задается величиной их аспектного отношения: отношением больших полуосей эллипсоида (т.е. протяженностью трещин) к меньшей полуоси (т.е. толщине трещин). Реалистичный диапазон аспектных отношений простирается от сотни до нескольких десятков тысяч. Диапазон изменения объемной доли трещин: от 0,1% до 2%. Например, плотность трещин 0,5% при аспектном соотношении 1000:1 соответствует средним расстояниям 20 см между трещинами, имею-

щими протяженность 1 м и толщину 1 мм.

Подбор эффективных параметров акустической модели должен производиться, исходя из требования близости, получаемой на основе данной модели синтетической сейсмической записи к реальным материалам. Степень такой близости определяется путем оценки сходства характеристик, соответствующих трещиноватой зоне. К числу таких характеристик следует отнести: азимутальные вариации скоростей суммирования и скоростей миграции, параметры недоспрямленности годографов ОСТ, латеральные изменения скоростной модели вдоль анализируемых геологических или сейсмических границ, результаты азимутальной инверсии (коэффициенты отражения и азимутальные градиенты), а также геологические характеристики (кривизна границ, разломы и т.д.) целевого интервала.

Результатом построения эффективной модели среды является тензор жесткости, характеризующий упругие свойства трещиноватого пласта, т.е. выражающий закон Гука в трехмерной анизотропной упругой среде, отражающий связь между векторами напряжений и деформации в среде [10]. Для модели, включающей анизотропные упругие слои, рассчитывается набор азимутальных сейсмограмм ОСТ средствами системы ИНПРЕС [11, 12]. Для рассчитанного синтетического волнового поля определяется тот же набор кинематических и динамических характеристик, что и для реальных данных. При необходимости производится коррекция модели и повторное моделирование.

Результатом итеративной процедуры построения эффективной модели трещиноватой зоны становится множество значений допустимых параметров модели. Параметры могут быть проинтерпретированы в терминах физических атрибутов трещиноватой среды, таких как доминирующее направление простирания трещин, плотность трещин, свойства заполнителя.

Анализ диагностических возможностей оценки трещиноватости в системе ИНПРЕС

Особенности изложенного выше подхода проиллюстрируем на примере анализа карбонатного коллектора. Для количественной оценки сейсмических признаков трещиноватости выполнен значительный объем тематического моделирования поля однократных отраженных волн, регистрируемых

на поверхности горизонтального слоистого полупространства, содержащего трещиноватые пласты. Упругие свойства соответствовали данным ГИС, имеющимся на площади скважин. В карбонатном интервале продуктивной толщи задавались три типа систем открытых вертикальных трещин:

- регулярные трещины — система однонаправленных трещин;
- трещины с доминирующей ориентацией — несколько систем параллельных трещин близкой направленности;
- разнонаправленные трещины — несколько систем трещин без какой-либо преобладающей ориентации.

На рис. 3 представлена типичная сейсмограмма однократных продольных отраженных волн, рассчитанная лучевым способом по модели скважины, включающей трещиноватый пласт карбонатов, который выделен цветом. Данные о продольных скоростях Vp нетрещиноватых пластов получены при акустическом каротаже. Данные о поперечных скоростях и плотности частично заданы по каротажным материалам, а в интервале отсутствия таких измерений — по регрессионной зависимости от продольных скоростей. Для определения свойств эффективной модели использовался подход, основанный на модели Дж. Эшелби эллипсоидального включения. Упругие свойства во включении (трещине) соответствовали свойствам флюида, упругие свойства окружающей включение сплошной среды соответствовали данным каротажа карбонатного интервала. Следует отметить, что в трещиноватой среде лучи не ортогональны фронтам, поэтому различают фазовые скорости (вдоль лучей) и групповые скорости, характеризующие перемещение фронта. При малой объемной трещиноватости, характерной для горных пород, различие этих скоростей для волн вдали от источника невелико. Рис. 4 показывает влияние трещиноватости на величину фазовых скоростей распространения волн при плотности трещин 0,5% и аспектном отношении 1000:1. В отсутствие трещин скорости в сплошной породе составляют

$$Vp=6152\text{м/с и }Vs=3375\text{м/с}$$

Появление трещин приводит к заметному снижению скоростей, а при однонаправленных трещинах и доминирующей ориентации

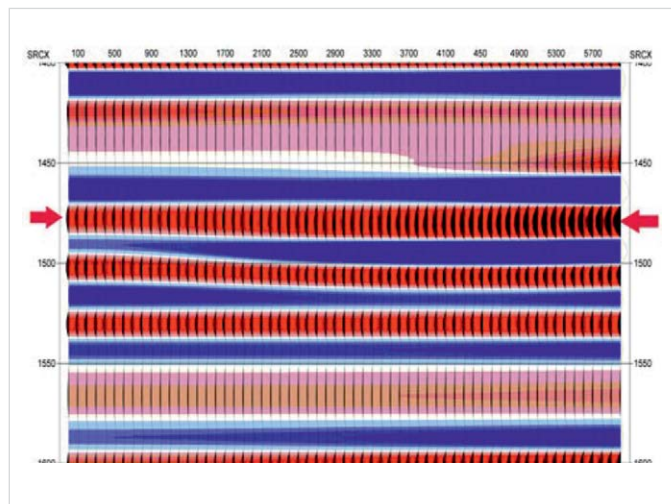


Рис. 2 — Эффект возрастания амплитуд отражений на кровле трещиноватого пласта

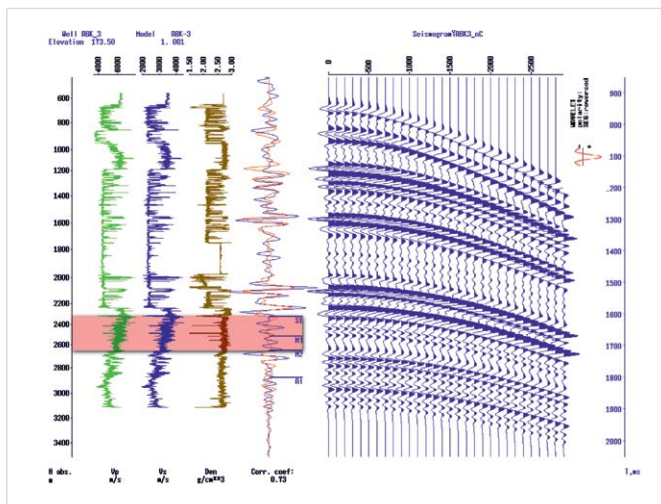


Рис. 3 — Акустическая модель с трещиноватым карбонатным коллектором и синтетическая сейсмограмма ОСТ

трещин — еще и к заметной азимутальной анизотропии скоростей, т.е. зависимости от угла между простиранием трещин и направлением распространения волны.

Изменения скорости приводят к изменениям коэффициентов отражения от границ карбонатной толщи и, соответственно, амплитуд отраженных волн и градиентов амплитуд. Соответствующие эффекты оценены по синтетическим сейсмограммам, рассчитанным для различных азимутов наблюдений (рис. 5).

Как отмечалось выше, наибольшей чувствительностью к трещиноватости обладают изменения амплитуд с удалением, особенно на больших расстояниях при полевых наблюдениях. Однако и в интервале ближних удалений 0–3500 м, соответствующем для карбонатов продуктивной толщи углов падения/отражения до 30°, градиенты амплитуд отражений заметно меняются в зависимости от величины и направления трещин. Наиболее ярко отличия между градиентами для трещиноватых и нетрещиноватых (изотропных) пород проявляются вблизи

верхней (рис. 5) и нижней границ интервала, где трещиноватые карбонаты контактируют с нетрещиноватыми вмещающими отложениями. Здесь при всех трех типах трещиноватости абсолютные значения градиентов заметно возрастают по сравнению со случаем отсутствия трещин. Внутри толщи карбонатов появление трещиноватости мало влияет на градиенты. Тип трещиноватости проявляется в степени азимутальной изменчивости градиентов. Она четко проявляется на кровле и подошве (но с разной полярностью) при параллельных трещинах, несколько ослабевает в случае субпараллельных трещин и практически отсутствует для разнонаправленных трещин.

Из проведенного рассмотрения следует, что для карбонатной толщи картирование величин градиентов амплитуд и их азимутальной изменчивости в сопоставлении с эталонными данными математического сейсмоделирования, является способом диагностики наличия и типа вертикальной трещиноватости. Помимо этого, для выявления и оценки вертикальной трещиноватости

по отраженным волнам можно было бы учитывать признаки снижения скорости распространения сейсмических колебаний и импедансов [12].

Оценим теперь пригодность имеющихся сейсмических материалов с точки зрения возможности выявления по ним трещиноватости. Для изучения трещиноватости по абсолютным значениям продольных скоростей и/или импедансов, найденных по сейсмическим данным, требуется, судя по данным рис. 4, чтобы погрешности их определения не превышали нескольких процентов. Это условие не соблюдается, уровень помех даже на участках наилучшего качества составляет более 20%, а на большей части площади достигает 30–40%. Для оценки азимутальных изменений скорости и/или импедансов необходимо дополнительно разделить сейсмограммы или угловые кубы на азимутальные составляющие, что за счет понижения кратности приведет к дополнительному ухудшению и без того неудовлетворительного соотношения «сигнал/помеха». Кроме того, скорости и импедансы весьма чувствительны к изменениям литологии

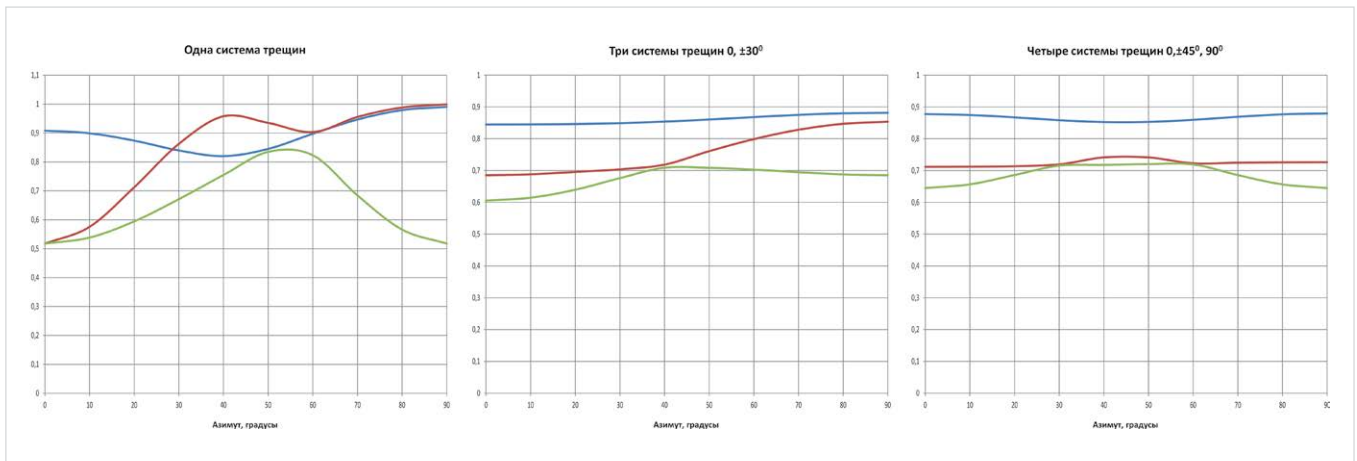


Рис. 4 — Азимутальные зависимости скоростей продольных (синие линии), вертикально поляризованных (красные линии) и горизонтально поляризованных (зеленые линии) поперечных колебаний по отношению к скоростям в нетрещиноватой среде для эффективных моделей с одной (слева), тремя (в центре) и четырьмя (справа) системами трещин

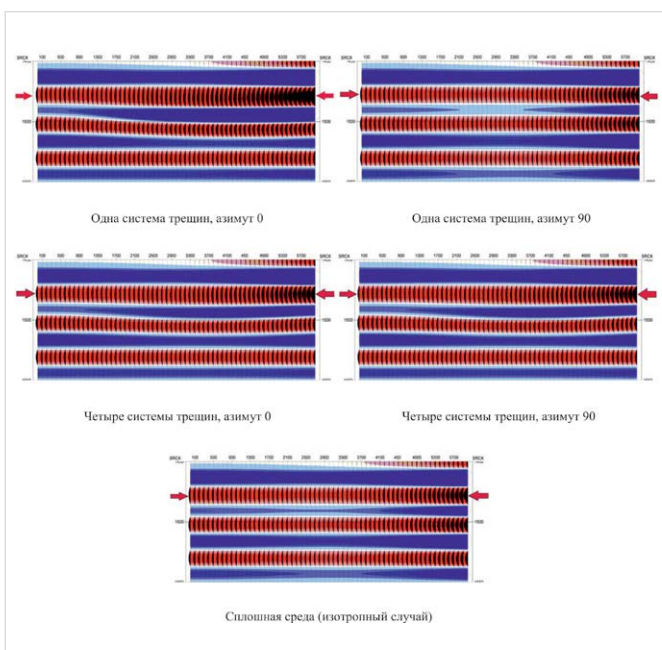


Рис. 5 — Синтетические сейсмограммы ОСТ для различных моделей трещиноватого коллектора. Сверху — для однонаправленных трещин, средний ряд для системы четырех систем трещин с ориентацией 0, ±45°, 90°, снизу — изотропный случай

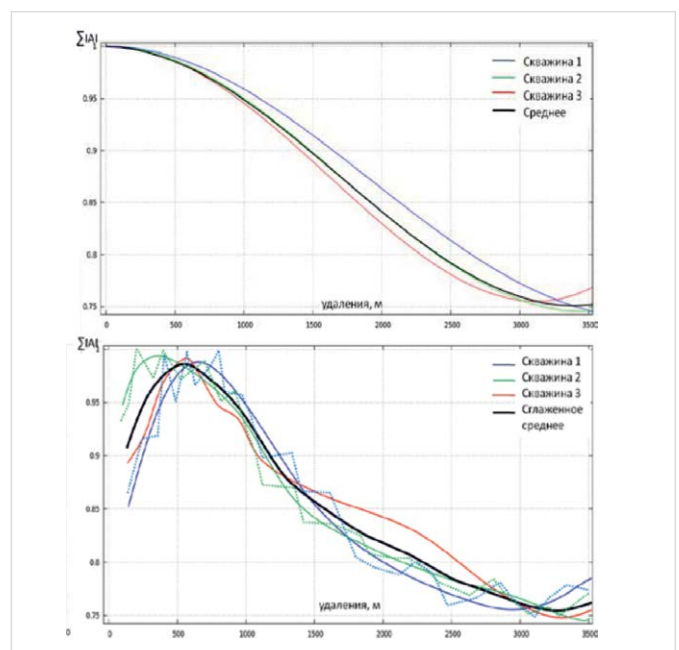


Рис. 6 — Изменение модулей амплитуд отраженных волн с удалением для модельных (сверху) и реальных (снизу) сейсмограмм

карбонатов, что даже при высоких соотношениях «сигнал/шум» создаст дополнительные трудности разделения эффектов, обусловленных трещинами от эффектов вариаций пористости, глинистости, доломитизации и т.д. Следовательно, анализ скоростей (импедансов) для оценки трещиноватости неперспективен.

Для анализа трещиноватости по градиентам амплитуд малое соотношение сигнал/помеха не является принципиальным ограничением. Как видно из рис. 6, несмотря на искажения, изменение амплитуд с удалением на синтетических и реальных сейсмограммах, полученных у скважин, неплохо соответствует друг другу, начиная с расстояний 500–700 м.

Изменение амплитуд на сглаженных (для ослабления помех) сейсмограммах составляет (рис. 6, справа) около 25%, что в среднем соответствует данным математического моделирования. Как следует из левого рис. 6, вариации литологии, слоистости и глубины залегания карбонатов от скважины к скважине меняют амплитудные градиенты синтетических сейсмограмм всего в пределах нескольких процентов, в то время как

появление трещиноватости приводит к более значимым изменениям (рис. 5), составляющим десятки процентов. Следовательно, анализ градиентов амплитуд в условиях анализируемой площади в принципе пригоден для изучения трещиноватости.

Для повышения точности оценок градиентов вначале было использовано накопление сейсмограмм вдоль направления корреляции отражающих горизонтов. По среднему данным рассчитаны азимутальные градиенты амплитуд через каждые 30°С и построены азимутальные диаграммы амплитуд и градиентов (рис. 7). По периферии диаграмм показано изменение амплитуд в зависимости от угла и направления. Радиус в каждом азимуте пропорционален величине амплитуды, а цвет соответствует угловому диапазону.

Вблизи центра каждой диаграммы отображены индикатрисы градиентов амплитуд: черным кружком — теоретически вычисленная для отражений от границ нетрещиноватых карбонатов, цветным многоугольником — рассчитанная по азимутальным сейсмическим кубам.

Форма экспериментально найденных индикатрис сильно изменчива по площади, что явно свидетельствует о низкой помехоустойчивости результатов. Подтверждением этого заключения являются оценки AVO параметра R_0 , значения которого в отсутствие амплитудных искажений были бы идентичны по всем азимутам. Фактически вариации R_0 составляют в среднем 20%.

Карты трещиноватости, рассчитанные по градиентам амплитуд, представлены на рис. 8, 9. Первая карта рассчитана в рамках стандартного подхода, реализованного в ряде зарубежных интерпретационных программных пакетов. Прогноз выполняется в предположении, что трещины идентично ориентированы в пределах расстояний, использованных для усреднения азимутальных градиентов (в данном случае 250x250 м). Индикатрисы градиентов аппроксимируют эллипсом, ориентация которого указывает направление трещин, а эксцентриситет (степень отклонения от окружности) пропорционален величине плотности трещин. Точки анализа, где эксцентриситеты в пределах точности определения близки к 1, относят к практически нетрещиноватым породам, остальные — к зонам развития трещин. Как видно из рис. 8, при стандартном подходе к интерпретации, трещины преимущественно ориентированы в широтном, меридиональном и северо-западном направлениях. К нетрещиноватым породам отнесены участки, в пределах которых эксцентриситеты отличаются от 1 не выше чем на 20%, т.е. не превышают 1,2. Их суммарная площадь составляет примерно 50%.

Карта, показанная на рис. 9, рассчитана с более детальным анализом эксцентриситетов с учетом результатов сейсмомоделирования, согласно которому величины градиентов при наличии трещин существенно возрастают по сравнению с эталонными значениями для нетрещиноватых пород. По этому критерию дополнительно выявлены и показаны на карте (рис. 9) участки развития разнонаправленных трещин, в совокупности не обладающих доминирующей ориентацией. Кроме того, зона развития ориентированных трещин, исходя из значений эксцентриситетов, разделена на две подзоны: однонаправленных трещин и совокупности трещин со сходной ориентацией.

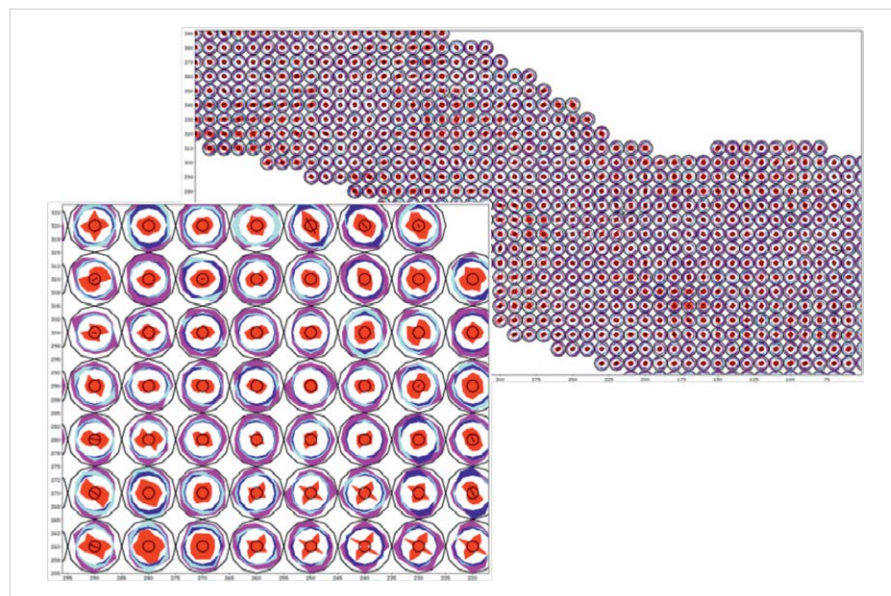


Рис. 7 — Азимутальные диаграммы амплитуд угловых кубов и градиентов (в центре диаграмм). Центральные черные кружки — теоретические значения градиентов при отсутствии трещин, красные многоугольники — измеренные значения градиентов сейсмограмм

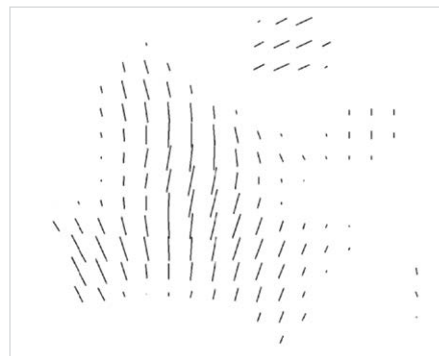


Рис. 8 — Прогноз вертикальной трещиноватости карбонатной толщи, в предположении параллельности трещин. Длина штрихов пропорциональна коэффициенту трещиноватости. Длина штрихов пропорциональна коэффициенту трещиноватости

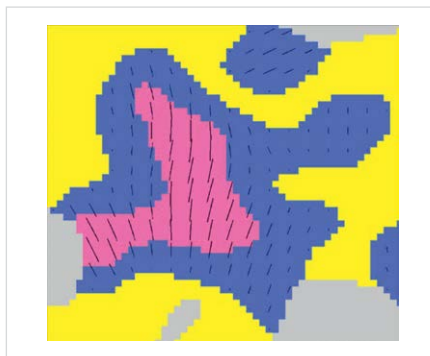


Рис. 9 — Прогноз вертикальной трещиноватости карбонатной толщи, в предположении разных систем ориентации трещин: **белый** — изотропная зона, **желтый** — разнонаправленные трещины, **синий** — наличие у трещин доминирующей ориентации, **розовый** — однонаправленные трещины. Длина штрихов пропорциональна коэффициенту трещиноватости

Итоги

Обосновывается алгоритмическая база программного обеспечения комплекса ИНПРЕС-ПРОГНОЗ для выявления и оценки параметров трещиноватых зон (коллекторов) по азимутальным вариациям сейсмических характеристик однократно отраженных и обманных волн. Демонстрируются примеры использования программы при сейсмическом построении.

Выводы

Из нескольких возможных вариантов интерпретации (отказа от прогноза трещиноватости; интерпретации, основанной исключительно на анализе сейсмических атрибутов; прогноза, контролируемого математическим моделированием сейсмических эффектов) наиболее подходящим является третий вариант при условии, что для формирования модели имеется достаточно геолого-геофизической скважинной информации.

Список литературы

1. Backus G.E. Long-wave elastic anisotropy produced by horizontal layering // J. Geophys. Res. 1962. №67. pp. 4427–4440.
2. Schoenberg M., Douma J. Elastic wave propagation in media with parallel fractures and aligned cracks // Geophysical prospecting. 1988. №26. pp. 571–590.
3. Бакулин А.В., Молотков Л.А. Эффективные сейсмические модели трещиноватых и пористых сред. СПб: Изд-во СПб ун-та, 1998. 141 с.
4. Bakulin A., Grechka V., Tsvankin I. Estimation of fracture parameters from reflection seismic data. Parts I, II, III // Geophysics. 2000. №65. pp. 1788–1830.
5. Far M.E., Sayers C.M., Thomsen L., Han De-hua and Castagna J.P. Seismic characterization of naturally fractured reservoirs using amplitude versus offset and azimuth analysis // Geophysical prospecting. 2013. №61 (2). pp. 427–447.
6. Thomsen L. Weak elastic anisotropy // Geophysics. 1986. №51. pp. 1954–1966.
7. Eshelby J.D. The determination of the elastic field of an ellipsoidal inclusions and related problems // Proceedings of the Royal Society of London. 1957. №241. pp. 376–396.
8. Шермергор Т.Д. Теория упругости микронеоднородных сред. М.: Наука, 1977. 400 с.
9. Баяк И.О. Теоретические основы определения эффективных физических свойств коллекторов углеводородов // Акустика неоднородных сред, Ежегодник РАО. 2011. №12. С. 107–120.
10. Grechka V. Application of seismic anisotropy in the oil and gas industry. Education tour series CIS. EAGE, 2009. 171 p.
11. Граф С.Ю. Кинематические методы анализа анизотропии сейсмических скоростей в трансверсально-изотропных средах // Геофизика. 2012. №5. С. 28–37.
12. Авербух А.Г., Граф С.Ю. Свойства отраженных волн в регулярно трещиноватых средах // Экспозиция Нефть Газ. 2014. №2 (34). С. 19–22.

ENGLISH

GEOPHYSICS

Geophysical model construction of fractured reservoir by means of seismic data

UDC 550.3

Authors:

Aleksandr G. Averbukh — Sc.D., leading specialist¹; inpres@cge.ru

Sergey Yu. Graf — Ph.D., associate professor², engineer¹; Sergey.Graf@tversu.ru

El'vira R. Akhmetova — programmer, engineer¹

Aleksey V. Garnov — programmer, engineer¹

¹Central Geophysical Expedition Joint Stock Company (CGE JSC), Moscow, Russian Federation

²Tver State University (TSU), Tver, Russian Federation

Abstract

Over several decades the meaning of fractured reservoirs in exploration geophysics is increasing steadily. Detection of fractured zones and estimation of its parameters became necessary stages of seismic interpretation. Essential difficulties during the determination of the model are associated with uncertainty of seismic interpretation and low resistance of estimated parameters. The approach, concerned with model selection and methodology of seismic interpretation, plays the key role, taking into account the facts, mentioned above. The main purpose of the article is to detect diagnostic features and physical properties of

fractured reservoirs; it can help to construct effective model of reservoir and to avoid wrong alternative methods of seismic interpretation.

Materials and methods

Effective-medium theory, seismic inversion.

Results

The algorithmic basis of INPRES software complex is described in the article. The interpretational complex INPRES is intended for the detection of fractured zones and estimation of its physical parameters, according to azimuthal variations of seismic characteristics.

Results of seismic interpretation are demonstrated.

Conclusions

The most relevant variation of interpretation among the three afore-mentioned (failure of fracturing forecast; interpretation, based only on seismic data; forecast, controlled with mathematical modeling of seismic effects) is the third variation, when there is enough geological and geophysical information for the forecast.

Keywords

fractured reservoir, effective model, seismic interpretation

References

1. Backus G.E. Long-wave elastic anisotropy produced by horizontal layering. J. Geophys. Res., 1962, issue 67, pp. 4427–4440.
2. Schoenberg M., Douma J. Elastic wave propagation in media with parallel fractures and aligned cracks. Geophysical prospecting, 1988, issue 26, pp. 571–590.
3. Bakulin A.V., Molotkov L.A. *Effektivnye seysmicheskie modeli treshchinovatykh i poristykh sred* [Effective seismic models of fractured and porous medium]. St. Petersburg: Izdatel'stvo Sankt-Peterburgskogo gosudarstvennogo universiteta, 1998, 141 p.
4. Bakulin A., Grechka V., Tsvankin I. Estimation of fracture parameters from reflection seismic data. Parts I, II, III. Geophysics. 2000, issue 65, pp. 1788–1830.
5. Far M.E., Sayers C.M., Thomsen L., Han De-hua and Castagna J.P. Seismic characterization of naturally fractured reservoirs using amplitude versus offset and azimuth analysis. Geophysical prospecting, 2013, issue 61 (2), pp. 427–447.
6. Thomsen L. Weak elastic anisotropy. Geophysics, 1986, issue 51, pp. 1954–1966.
7. Eshelby J. D. The determination of the elastic field of an ellipsoidal inclusions and related problems. Proceedings of the Royal Society of London, 1957, issue 241, pp. 376–396.
8. Shermergor T.D. *Teoriya uprugosti mikroneodnorodnykh sred* [Theory of microinhomogeneous medias resiliency]. Moscow: 1977, 400 p.
9. Bayuk I.O. *Teoreticheskie osnovy opredeleniya effektivnykh fizicheskikh svoystv kolektorov uglevodorodov* [Theoretical basis of determination of effective physical properties of hydrocarbon reservoirs]. Acoustics of inhomogeneous medias, 2011, issue 12, pp. 107–120.
10. Grechka V. Application of seismic anisotropy in the oil and gas industry. Education tour series CIS. EAGE, 2009, 171 p.
11. Graf S.Yu. *Kinematicheskie metody analiza anizotropii seysmicheskikh skorostey v transversal'no-izotropnykh sredakh* [Kinematic analysis of methods of seismic velocity anisotropy transversely isotropic media]. The Russian geophysics journal, 2012, issue 5, pp. 28–37.
12. Averbukh A.G., Graf S.Yu. *Svoystva otrazhennykh voln v regulyarno treshchinovatykh sredakh* [Characteristics of reflected waves in regular fractured media]. Exposition Oil Gas, 2014, issue 2 (34), pp. 19–22.