

КОЛИЧЕСТВЕННЫЕ ОЦЕНКИ ВЛИЯНИЯ РЕГУЛЯРНОЙ ТРЕЩИНОВАТОСТИ ГОРНЫХ ПОРОД НА СКОРОСТИ РАСПРОСТРАНЕНИЯ И ОТРАЖЕНИЕ СЕЙСМИЧЕСКИХ ВОЛН

Александр Григорьевич Авербух, Сергей Юрьевич Граф
ОАО Центральная геофизическая экспедиция, г. Москва,
Тверской государственной университет, г. Тверь

Выявление трещиноватых зон и оценка их параметров являются важными задачами современной сейсморазведки.

Регулярно трещиноватые среды, представляющие собой объект нашего исследования, характеризуются следующими параметрами:

- преобладающим направлением трещин, т.е. регулярностью их расположения;
- плотностью трещин, т.е. долей, занимаемой трещинами в единице объема среды или в направлении, ортогональном простиранию трещин.
- физическими свойствами вмещающей матрицы;
- физическими свойствами заполняющей породы или флюида;

Различным способом построения эффективных моделей трещиноватых сред в сейсморазведке и свойствам сейсмически анизотропных сред посвящена обширная литература [1 - 7].

Авторы доклада фокусируют внимание на основных моделях, позволяющих достаточно просто проследить связь между физическими свойствами трещиноватых пород, характером эквивалентных эффективных сред и их влиянием на кинематику и динамику сейсмических волн.

В 1962 г. Г. Бэйкусом [2] предложен метод построения анизотропных эффективных моделей сред, эквивалентных системам тонких изотропных параллельных слоев с условием стационарности, заключающимся в непрерывности деформаций в направлении вдоль границ слоев и непрерывности напряжений в направлении, ортогональном к границам слоев. Процедура осреднения Бэйкуса использовалась впоследствии многими авторами и была обобщена М. Шоенбергом [7] на случай систем тонких анизотропных слоев с соблюдением условия стационарности. Метод Шоенберга позволяет строить эффективные анизотропные среды, эквивалентные в некотором смысле трещиноватым средам с произвольным набором разнонаправленных систем трещин.

На основе процедуры осреднения Бэйкуса М. Шоенбергом была предложена модель описания трещиноватых сред, известная как модель плоских параллельных трещин с условием линейного проскальзывания [7].

Другой классической моделью трещиноватых сред является предложенная в 1981 г. Дж. Хадсоном [6] модель монетообразных трещин. Отметим, что модель монетообразных трещин Хадсона допускает обобщение на случай взаимодействующих трещин, предполагающий перетекание флюида и наличие сферических пор.

Во всех указанных случаях свойства трещиноватой среды находят свое выражение в структуре и значениях эффективного тензора жесткости $\mathbf{C} = \{C_{ij}\}_{i,j=1,6}$, отражающего связь $\sigma = \mathbf{C}\varepsilon$ между векторами напряжений σ и деформации ε .

Авторами настоящих тезисов получены явные зависимости, позволяющие находить компоненты C_{ij} эффективного тензора жесткости \mathbf{C} по значениям скоростей и плотностей во вмещающей матрице и в трещинах и по значению плотности трещин d . В частности, пусть трещины ортогональны оси абсцисс. Тогда компоненты эффективного тензора \mathbf{C} в соответствии со схемой Бэйкуса определяются по формулам

$$C_{11} = \left\langle \frac{1}{\rho v_p^2} \right\rangle^{-1} = \rho v_p^2 \left(1 - d \left(1 - \frac{\rho v_p^2}{\hat{\rho} \hat{v}_p^2} \right) \right)^{-1},$$

$$C_{33} = \left\langle \rho v_p^2 \right\rangle - \left\langle \frac{\rho (v_p^2 - 2v_s^2)^2}{v_p^2} \right\rangle + \left\langle 1 - 2 \frac{v_s^2}{v_p^2} \right\rangle^2 \left\langle \frac{1}{\rho v_p^2} \right\rangle^{-1} =$$

$$= \rho v_p^2 \left\{ 1 - 4d(1-d) \frac{v_s^2}{v_p^2} \left(1 - \frac{\hat{\rho} \hat{v}_s^2}{\rho v_s^2} \right) \left(1 - \frac{\hat{v}_s^2}{\hat{v}_p^2} - \frac{\rho v_p^2}{\hat{\rho} \hat{v}_p^2} \left(1 - \frac{v_s^2}{v_p^2} \right) \right) \right\} \left(1 - d \left(1 - \frac{\rho v_p^2}{\hat{\rho} \hat{v}_p^2} \right) \right)^{-1},$$

$$C_{44} = \left\langle \rho v_s^2 \right\rangle = \rho v_s^2 \left(1 - d \left(1 - \frac{\hat{\rho} \hat{v}_s^2}{\rho v_s^2} \right) \right),$$

$$C_{55} = \left\langle \frac{1}{\rho v_s^2} \right\rangle^{-1} = \rho v_s^2 \left(1 - d \left(1 - \frac{\rho v_s^2}{\hat{\rho} \hat{v}_s^2} \right) \right)^{-1},$$

$$C_{13} = \left\langle \frac{1}{\rho v_p^2} \right\rangle^{-1} \left(1 - 2 \left\langle \frac{v_s^2}{v_p^2} \right\rangle \right) = \rho v_p^2 \left\{ 1 - 2 \frac{v_s^2}{v_p^2} \left(1 - d \left(1 - \frac{\hat{v}_s^2 v_p^2}{\hat{v}_p^2 v_s^2} \right) \right) \right\} \left(1 - d \left(1 - \frac{\rho v_p^2}{\hat{\rho} \hat{v}_p^2} \right) \right)^{-1},$$

причем $C_{23} = 2C_{44} - C_{33}$. В данной записи v_p , v_s , ρ – скорости распространения волн и плотность во вмещающей матрице, а \hat{v}_p , \hat{v}_s , $\hat{\rho}$ – скорости и плотность в заполнителе трещин. Эффективные тензора жесткости для сред, полученных наложением нескольких систем трещин, следующих в различных направлениях, могут быть получены сходным образом.

Заметим, что процедура осреднения Шоенберга при изменении направлений трещиноватости в составляющих слоях, вообще говоря, не коммутативна, т.е. не точна с физической точки зрения, что объясняется нарушением условий стационарности Бэйкуса на пересечениях двух систем трещин. Однако при малых значениях плотности трещин, свойственных геологическим средам, указанной неточностью допустимо пренебречь.

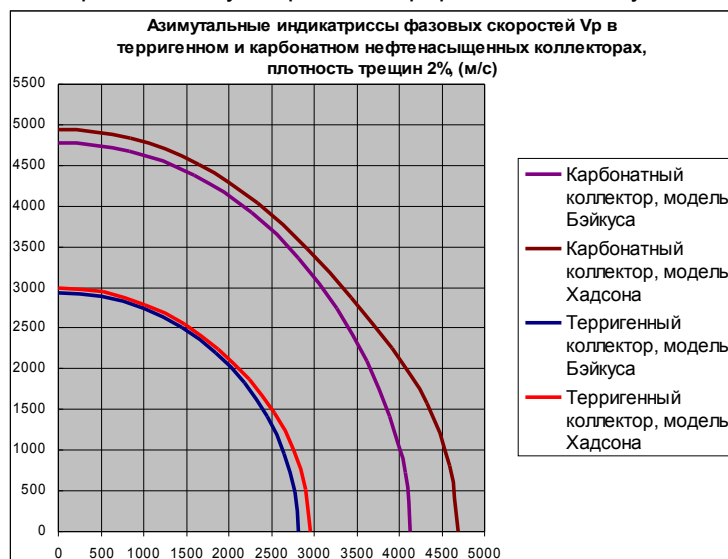
Все упомянутые способы построения эффективных трещиноватых сред приводят к тензорам жесткости одинаковой структуры, но, вообще говоря, с различными количественными проявлениями вызванных трещиноватостью эффектов анизотропии.

Следовательно, при оценке особенностей, вызванных влиянием трещиноватости в исследуемой среде, следует учитывать выбор метода построения эффективной модели, приводящий при одних и тех же физических параметрах среды к различным кинематическим и динамическим результатам.

Еще более важно обратное замечание. При известных свойствах геологических пород и имеющихся оценках параметров сейсмической записи, исходя из различных представлений о модели трещиноватой среды, могут быть получены различные оценки параметров трещиноватости, такие как плотность трещин, свойства заполнителя и т.д. С учетом сделанных замечаний, очевидно, что задача определения физических свойств трещиноватой среды, вообще говоря, некорректна, тем более, что реальная трещиноватая среда безусловно устроена более сложно по сравнению с идеализированными представлениями, используемыми при ее анализе.

В соответствии с обозначенной выше схемой авторами была проведена серия численных экспериментов, моделирующих кинематические и динамические эффекты влияния трещиноватости на отражение продольных и обменных волн от трещиноватых коллекторов при различных значениях плотности трещин и различных методах формирования эффективной среды. Рассмотренные модели условно представляли терригенный и карбонатный коллектора с различными типами заполнителя (водонасыщенный, нефтенасыщенный, газонасыщенный).

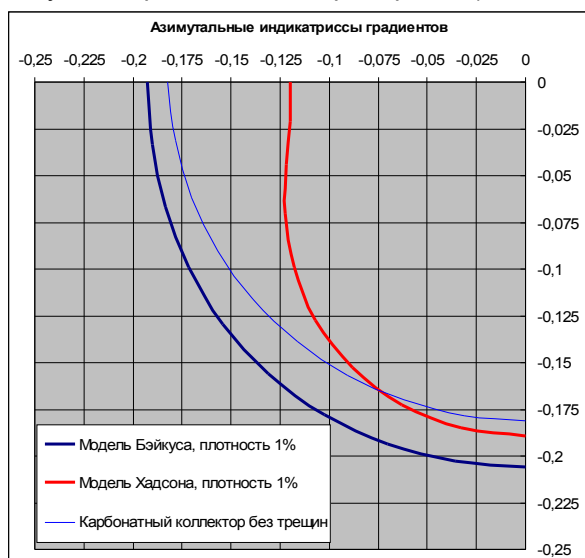
При моделировании учитывались эффекты поляризации и преломления волн на границах однородных упругих пластов моделей, различие фазовых и групповых скоростей и углов падения в трехмерной анизотропной среде. Зависимость определенных на основе численного решения уравнения Кристоффеля фазовых скоростей квазипродольных волн в трещиноватых нефтенасыщенных коллекторах от азимута проиллюстрирована на следующей диаграмме.



Азимутальные зависимости фазовых скоростей квазипродольных волн в терригенных и карбонатных нефтенасыщенных коллекторах при плотности трещин 2% для моделей Бэйкуса и Хадсона (монетообразных трещин).

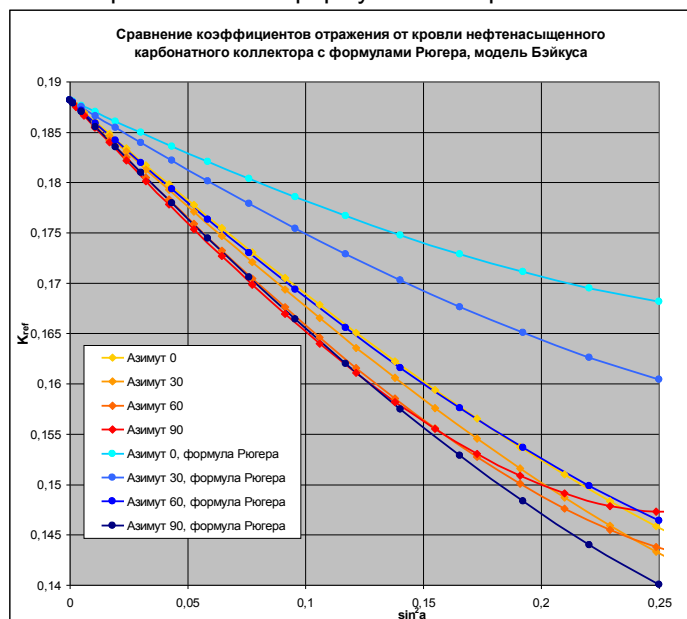
Использование приведенных выше зависимостей компонент тензора жесткости от физических параметров трещиноватой среды позволило отказаться от широко распространенной системы параметров Томсена и Цванкина [4], не очень удобных для моделирования динамических эффектов и описания сред с несколькими неортогональными системами трещин.

Азимутальные зависимости оцениваемых кинематических и динамических параметров отраженных от трещиноватого слоя волн, вообще говоря, не являются эллиптическими, но достаточно часто могут быть приближены эллипсами. При использовании эффективных моделей среды, построенных по схеме Хадсона, азимутальные зависимости градиентов становятся менее эллиптическими. Характер азимутальных зависимостей градиентов коэффициентов отражения от трещиноватого слоя проиллюстрирован на следующей диаграмме (большие по абсолютной величине значения градиентов соответствуют направлению поперек трещин).



Азимутальные зависимости градиентов коэффициентов отражения квазипродольных волн от кровли карбонатного нефтенасыщенного коллектора при плотности трещин 1% для моделей Бэйкуса и Хадсона (монетообразных трещин). Тонкой линией показано значение градиента в изотропном случае (при отсутствии трещин).

Следует отметить, что получившие широкое распространение формулы А. Рюгера (см., например, [2]) для расчета коэффициентов отражения в слабоанизотропных трансверсально-изотропных средах приводят к несколько отличным азимутальным зависимостям, чем точные значения, полученные на основе решения уравнения Цёппритца, использовавшиеся авторами настоящего доклада. Это связано, в частности, с достаточно высокой контрастностью рассматриваемой среды, которую не всегда можно считать слабоанизотропной, а также с выраженной неэллиптичностью анизотропии в трещиноватых средах. На следующей диаграмме приведены результаты сопоставления азимутальных зависимостей коэффициентов отражения, рассчитанных с помощью точных решений и по формулам Рюгера.

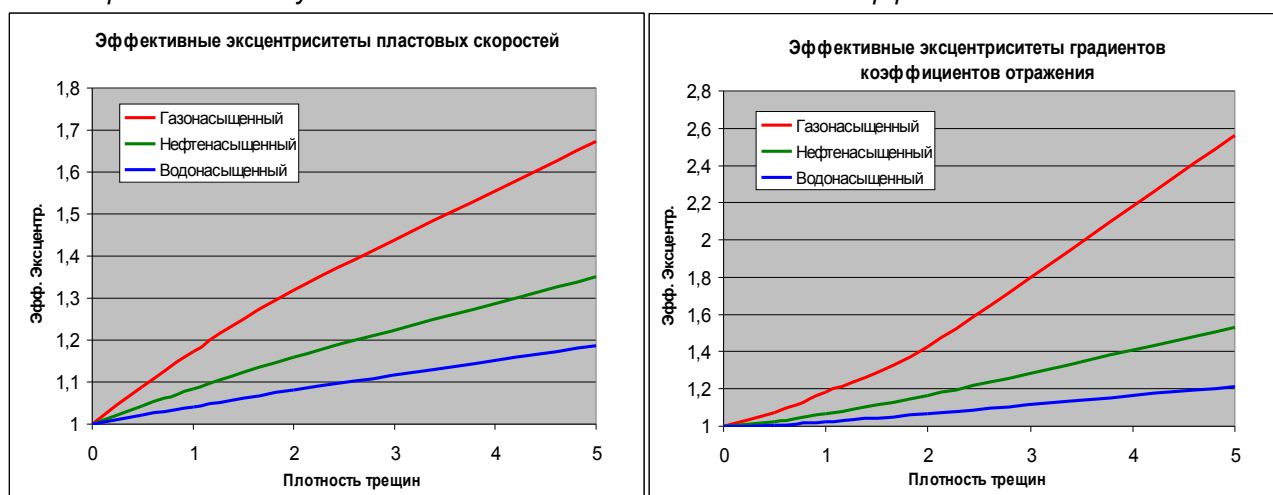


Азимутальные зависимости коэффициентов отражения квазипродольных волн от кровли карбонатного нефтенасыщенного коллектора при плотности трещин 2% для модели Бэйкуса, рассчитанные на основе уравнения Цёппритца и по формулам Рюгера.

Во всех случаях сравнения результатов применения формулы Рюгера с точными решениями отмечается больший (нехарактерный для реальных сейсмических данных) азимутальный разброс значений коэффициентов отражения, рассчитанных по формулам Рюгера. Таким образом, использование формул Рюгера для анализа трещиноватых коллекторов возможно лишь на феноменологическом уровне.

При всей сложности проблемы определения физических параметров трещиноватой среды по сейсмическим атрибутам необходимо отметить, что общий характер влияния процента трещиноватости на кинематику и динамику отраженных волн для той или иной эффективной модели остается достаточно устойчивым и может быть описан экспериментальной или эвристической зависимостью. Форма подобных зависимостей при вариации отдельных параметров трещиноватой среды (таких как направление и плотность трещин, скорости и плотность заполнителя трещин) представляет собой основу для решения поставленной обратной задачи.

На следующих диаграммах приведены примеры зависимостей эффективных эксцентриситетов (отношений максимальных азимутальных значений к минимальным) фазовых скоростей в трещиноватых коллекторах и коэффициентов отражения квазипродольных волн от кровли трещиноватого коллектора, рассчитанные в соответствии со схемой Бэйкуса. Из проведенного авторами анализа и, в частности, из приведенных ниже диаграмм следует, что трещиноватость может быть выявлена, а плотность трещин количественно оценена путем анализа смоделированных азимутальных кинематических и динамических эффектов.



Эффективные эксцентриситеты азимутальных значений фазовых скоростей и коэффициентов отражения квазипродольных волн, отраженных от трещиноватых карбонатных коллекторов с различными типами заполнителей, в зависимости от плотности трещин. Эффективная среда построена в соответствии со схемой Бэйкуса.

Заметим, что эффективные эксцентриситеты фазовых скоростей оказываются менее выраженными, чем аналогичные эксцентриситеты коэффициентов отражения, что повышает ценность последних при определении параметров трещин.

Отдельный интерес представляет вопрос о возможности выявления и анализа трещиноватых коллекторов при наличии в них нескольких произвольно ориентированных систем трещин. В случае, когда в коллекторе присутствуют две ортогональные системы трещин, возникающая эффективная анизотропная среда оказывается орторомбической, а если две системы трещин находятся в произвольном положении, то моноклиальной.

Результаты численного моделирования для коллекторов такого типа позволяют сделать вывод о том, что диагностика и определение параметров трещиноватых слоев, обладающих несколькими равноценными системами трещин или хаотическим расположением трещин, по анизотропии параметров отраженных волн представляются недостоверными. Перспективы в таком случае связаны с высоко точными измерениями площадных изменений абсолютных величин пластовых параметров. Для этого целесообразно использовать методы азимутальной анизотропной сейсмической инверсии или томографические процедуры построения глубинных скоростных моделей.

Точно также азимутальные зависимости сейсмических атрибутов, основанных на анализе квазипродольных волн, не позволяют определить величину вертикального наклона систем трещин.

Отдельно следует отметить, что для эффективных моделей трещиноватых сред, построенных по схеме Хадсона (моделей с монетообразными трещинами), характерны более ярко выраженные анизотропные азимутальные эффекты, как правило, нетипичные для физических сред.

Тем не менее, модели монетообразных трещин, как и модели Бэйкуса-Шоенберга, являются приемлемыми и допустимыми для описания трещиноватых сред при регулярной трещиноватости 1-3%. Для построения моделей эффективных сред с большим процентом регулярной трещиноватости более корректным оказывается применение процедуры Бэйкуса.

Выводы:

- выбор типа эффективной модели трещиноватой среды оказывает существенное влияние на результат интерпретации сейсмических данных;
- наличие трещиноватости, плотность которой не превышает 1% или нерегулярной трещиноватости, вероятнее всего является неразличимым при анализе кинематических или динамических параметров отраженных волн;
- наличие устойчивых площадных зон эллипсовидных азимутальных аномалий в поведении пластовых скоростей и особенно коэффициентов отражения и их градиентов может быть проинтерпретировано как указание на присутствие в среде системы согласованных субвертикальных трещин. При этом чувствительными к наличию трещиноватости оказываются не только азимутальные отношения градиентов, но и их абсолютные значения, а также, очевидно, и абсолютные значения нормальных коэффициентов отражения. Доминирующее направление и плотность трещин могут быть оценены, исходя из выбранной для описания трещиноватости эффективной модели среды и скважинных данных (или предположений) об упругих свойствах матрицы и характере заполнения трещин;
- диагностика трещиноватости по кинематическим признакам, таким как азимутальное поведение скоростей суммирования, средних или пластовых скоростей, и определение на их основе параметров трещин представляются реалистичными только для достаточно мощных толщ, которым обычно соответствует приемлемая точность определения кинематических атрибутов сейсмической записи;
- квазипоперечные и обменные волны обладают большей (по сравнению с продольными волнами) чувствительностью к наличию трещиноватости, что представляет собой стимул для развития методов их использования в процессе интерпретации сейсмического материала.

Список литературы

1. Авербух А. Г., Подъяпольский Г. С., Золотов Е. М. *Скорости распространения плоских упругих волн в осесимметричных неоднородных средах* // Физика Земли, 1975. № 3. С. 43 – 51.
2. Граф С. Ю. *Кинематические методы анализа анизотропии сейсмических скоростей в трансверсально-изотропных средах* // Геофизика, 2012. Спец. выпуск к 45-летию ЦГЭ. С. 28 – 37.
3. Backus G. E. *Long-wave elastic anisotropy produced by horizontal layering* // J. Geophys. Res. 1962, 67. P. 4427 – 4440.
4. Bakulin A., Grechka V., Tsvankin I. *Estimation of fracture parameters from reflection seismic data. Parts I, II, III* // Geophysics, 2000. 65. P. 1788 – 1830.
5. Grechka V. *Application of seismic anisotropy in the oil and gas industry*. Education tour series CIS. EAGE, 2009. 171 p.
6. Hudson J. A. *Wave speeds and attenuation of elastic waves in material containing cracks* // Geophys. J. Roy. Astr. Soc., 1981. 64. P. 133 – 150.
7. Schoenberg M., Muir F. *A Calculus for finely layered anisotropic media* // Geophysics. 1989, 54. P. 581 – 589.