

Свойства отраженных волн в регулярно трещиноватых средах

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. Различным способом построения эффективных моделей трещиноватых сред в сейсморазведке и свойствам сейсмически анизотропных сред посвящена обширная литература [1 - 7]. Авторы доклада фокусируют внимание нескольких основных моделях, позволяющих 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 $c_{ij} = c_{ij}^{-1}$, отражающего связь $\sigma = c \varepsilon$ между векторами напряжений σ и деформации ε .

Авторами настоящих тезисов получены явные зависимости, позволяющие находить компоненты c_{ij} эффективного тензора жесткости 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 c в соответствии со схемой Бэйкуса определяются по формулам

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

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

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

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

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

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

причем $c_{23} = 2 c_{44} - c_{33}$. В данной записи v_p, v_s, ρ – скорости распространения волн и плотность во вмещающей матрице, а \hat{v}_p, \hat{v}_s, R – 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.

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 волн от трещиноватых коллекторов при различных значениях плотности трещин и различных методах формирования эффективной среды. Рассмотренные модели представляли собой трехмерную горизонтально слоистую среду, включающую в себя серию расположенных в карбонатной толще азимутально анизотропных трещиноватых нефтенасыщенных пластов. Соответствующая акустическая модель приведена на рис.1. Плотность трещин варьировалась в пределах от 0 до 5 %.

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 и квазипереречных волн в трещиноватых коллекторах от азимута, а также отношение квазипродольных и квазипереречных волн проиллюстрированы на следующих диаграммах. Горизонтальная ось на диаграммах соответствует азимуту 0 – направлению, ортогональному плоскости простирания трещин.

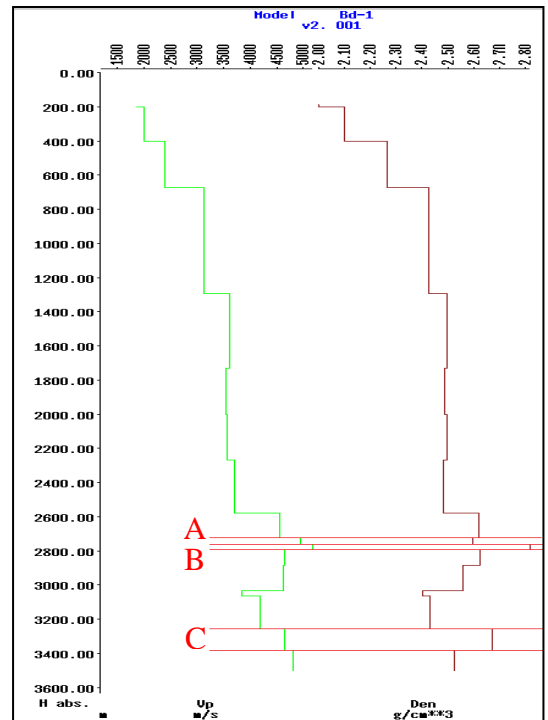


Рис. 1. Глубинная акустическая модель. Трещиноватые пласты А, В, С отмечены красными прямыми.

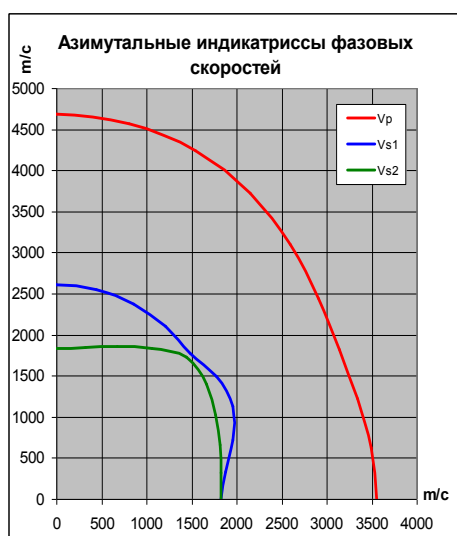


Рис. 2. Азимутальные индикатриссы фазовых скоростей в трещиноватом слое А. Плотность трещин 2%. Эффективная среда построена по схеме Бэйкуса.

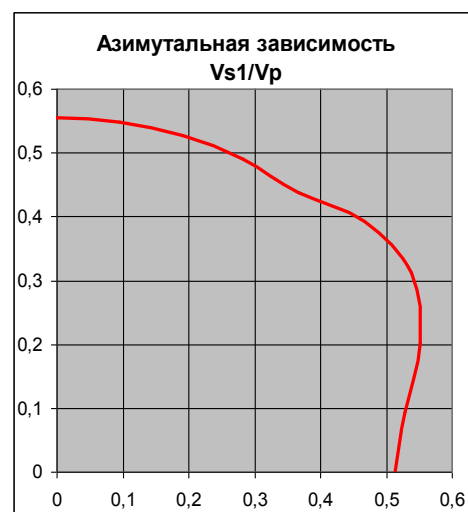


Рис. 3. Азимутальная индикатрисса отношения фазовых скоростей вертикально поляризованной квазипереречной волны и квазипродольной волны в трещиноватом слое А. Плотность трещин 2%.

На следующих диаграммах приведены примеры фрагментов азимутальных сейсмограмм ОСТ, иллюстрирующие изменение динамики волнового поля в зависимости от плотности трещин и азимута. Азимут 0 соответствует направлению, ортогональному плоскости простирания трещин. Цветом выделены участки записи, соответствующие отражению от трещиноватой пачки.

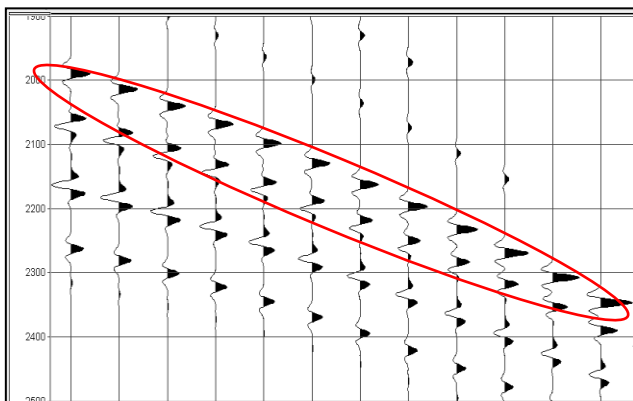


Рис. 4.1. Плотность трещин 1%, азимут 0.

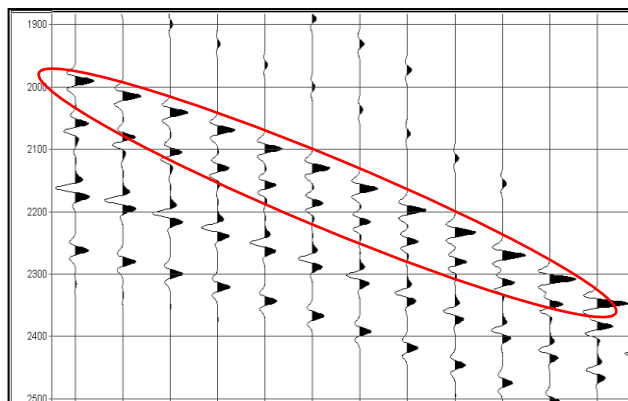


Рис. 4.2. Плотность трещин 1%, азимут 90.

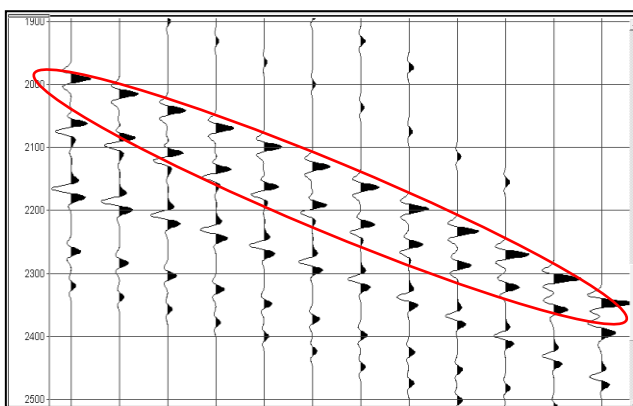


Рис. 4.3. Плотность трещин 3%, азимут 0.

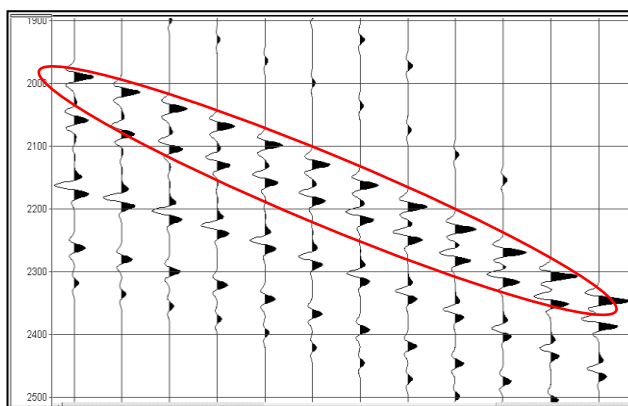


Рис. 4.4. Плотность трещин 3%, азимут 90.

Рис. 4. Азимутальные динамические эффекты для отражения от трещиноватой пачки А-В.

Азимутальные индикатрисы оцениваемых кинематических и динамических параметров отраженных от трещиноватого слоя волн, вообще говоря, не являются эллиптическими, но достаточно часто могут быть приближены эллипсами. Характер азимутальных зависимостей градиентов амплитуд, соответствующих отражению от подошвы трещиноватого слоя А модели, а также зависимость эффективных эксцентриситетов градиентов амплитуд от плотности трещин проиллюстрированы на следующих диаграммах.

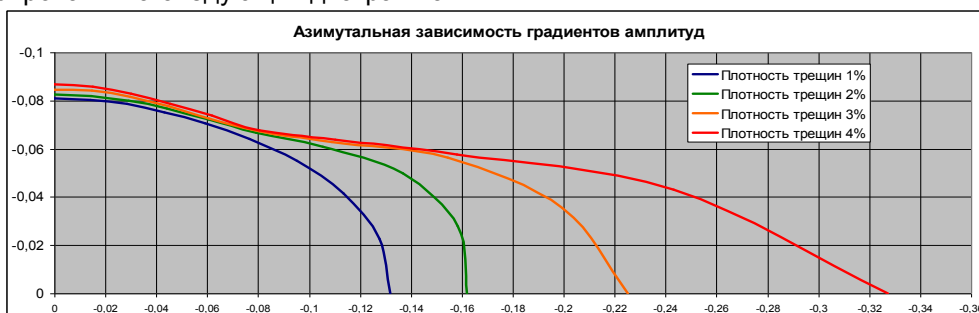


Рис. 5.1. Азимутальные индикатрисы градиентов амплитуд.

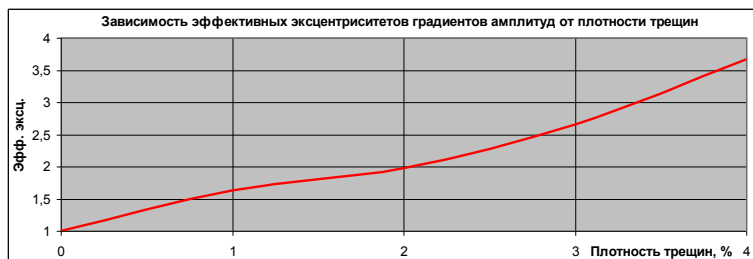


Рис. 5.2. Азимутальные индикатрисы градиентов амплитуд.

Заметим, что эффективные эксцентриситеты фазовых скоростей оказываются менее выраженными, чем аналогичные эксцентриситеты градиентов амплитуд, 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 ортогональных системы трещин, возникающая эффективная анизотропная среда оказывается орторомбической, а если две системы трещин находятся в произвольном положении, то моноклиальной.

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 (см. рис. 5.2.). 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.

Из проведенного авторами анализа и, в частности, из приведенных выше диаграмм следует, что трещиноватость может быть выявлена, а плотность трещин количественно оценена путем анализа смоделированных азимутальных кинематических и динамических эффектов.

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.

Проведенные исследования позволяют сделать следующие **выводы**:

- предложена методология определения сейсмических характеристик регулярно трещиноватых сред по упругим свойствам матрицы породы и заполнителя трещин, позволяющая получать количественные решения широкого круга прямых и обратных задач сейсморазведки;
- разработан инструмент для численного моделирования кинематических и динамических вариаций волновых полей, соответствующих отражениям от трещиноватых пластов;
- предложена методология оценки плотности трещин по эффективным эксцентриситетам азимутальной изменчивости AVO градиентов и пластовых скоростей продольных волн, исходя из выбранной для описания трещиноватости эффективной модели среды и скважинных данных (или предположений) об упругих свойствах матрицы и характере заполнения трещин;
- разработан аналитический аппарат для оценки параметров трещиноватости по азимутальным вариациям сейсмических характеристик однократно отраженных волн.

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.