

Свойства отраженных волн в регулярно трещиноватых средах

А.Г. Авербух

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

С.Ю. Граф

канд. ф.м.н., доцент, инженер¹
inpres@cge.ru, Sergey.Graf@tversu.ru

¹ОАО Центральная геофизическая экспедиция,
Москва, Россия

Анализируются качественные и количественные эффекты динамики волны, отраженной от трещиноватого коллектора. Оценивается азимутальная зависимость сейсмических параметров от плотности трещин, количества и ориентации систем трещин, а также от выбора различных типов эффективных моделей трещиноватых сред. Рассматривается вопрос о связи эффективных моделей трещиноватых сред с физическими параметрами трещин. Предлагается аналитический аппарат для оценки параметров трещиноватости по азимутальным вариациям сейсмических характеристик однократно отраженных волн.

Материалы и методы

Методы теории эффективных сред. Метод численного моделирования сейсмических волновых полей однократно отраженных волн в анизотропных средах.

Ключевые слова

трещиноватый коллектор, сейсмически анизотропная среда, эффективная модель

Выявление трещиноватых зон и оценка их параметров являются важными задачами современной сейсморазведки. Различным способам построения эффективных моделей трещиноватых сред в сейсморазведке и свойствам сейсмически анизотропных сред посвящена обширная литература [1–7]. Авторы настоящей работы 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

$$\mathbf{C} = \{C_{ij}\}_{i,j=1,6},$$

отражающего связь $\sigma = \mathbf{C}\epsilon$ между векторами напряжений σ и деформации ϵ .

Авторами настоящей работы получены явные $\mathbf{C}$ зависимости, позволяющие находить компоненты эффективного тензора жесткости 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 определяют по формулам

$$\begin{aligned} C_{11} &= \left\langle \frac{1}{\rho v_p^2} \right\rangle^{-1} = \rho v_p^2 \left(1 - d \left(1 - \frac{\rho v_p^2}{\hat{\rho} \hat{v}_p^2} \right) \right)^{-1}, \\ C_{33} &= \left\langle \rho v_p^2 \right\rangle - \left\langle \frac{\rho (v_p^2 - 2v_s^2)}{v_p^2} \right\rangle + \left\langle 1 - 2 \frac{v_s^2}{v_p^2} \right\rangle \times \\ &\times \left\langle \frac{1}{\rho v_p^2} \right\rangle^{-1} = \rho v_p^2 \left\{ 1 - 4d \left(1 - d \right) \frac{v_s^2}{v_p^2} \left(1 - \frac{\hat{\rho} \hat{v}_s^2}{\rho v_p^2} \right) \right\} \times \\ &\times \left(1 - \frac{\hat{v}_s^2}{v_p^2} - \frac{\rho}{\hat{\rho}} \frac{v_p^2}{\hat{v}_p^2} \left(1 - \frac{v_s^2}{v_p^2} \right) \right) \left(1 - d \left(1 - \frac{\rho v_p^2}{\hat{\rho} \hat{v}_p^2} \right) \right)^{-1}, \\ C_{44} &= \left\langle \rho v_s^2 \right\rangle = \rho v_s^2 \left(1 - d \left(1 - \frac{\hat{\rho} \hat{v}_s^2}{\rho v_s^2} \right) \right), \\ C_{55} &= \left\langle \frac{1}{\rho v_s^2} \right\rangle^{-1} = \rho v_s^2 \left(1 - d \left(1 - \frac{\rho v_s^2}{\hat{\rho} \hat{v}_s^2} \right) \right)^{-1}, \\ C_{13} &= \left\langle \frac{1}{\rho v_p^2} \right\rangle^{-1} \left(1 - 2 \frac{v_s^2}{v_p^2} \right) = \\ &= \rho v_p^2 \left\{ 1 - 2 \frac{v_s^2}{v_p^2} \left(1 - d \left(1 - \frac{\hat{v}_s^2}{\hat{v}_p^2} \frac{v_p^2}{v_s^2} \right) \right) \right\} \times \\ &\times \left(1 - d \left(1 - \frac{\rho v_p^2}{\hat{\rho} \hat{v}_p^2} \right) \right)^{-1}, \end{aligned}$$

причем $C_{23} = 2C_{44} - C_{33}$. В данной записи

$$v_p, v_s, \rho$$

— 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,

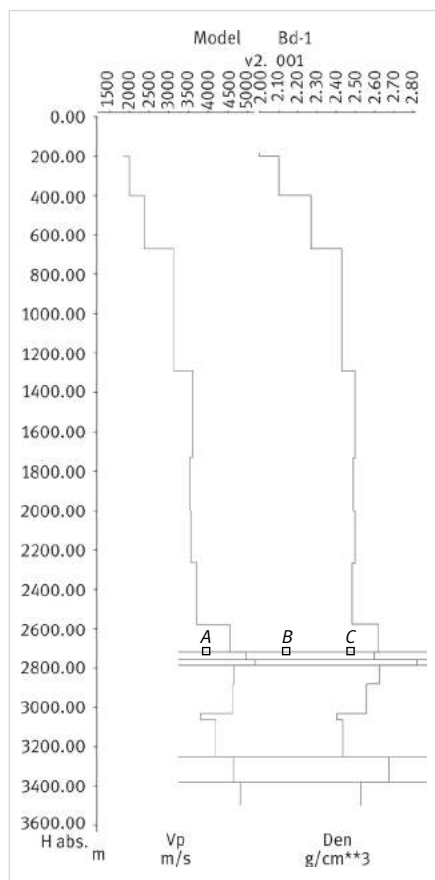


Рис. 1 — Глубинная акустическая модель. Трещиноватые пласты А, В, С отмечены с квадратами

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

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.

Азимутальные индикатрисы оцениваемых кинематических и динамических параметров отраженных от трещиноватого слоя волн, вообще

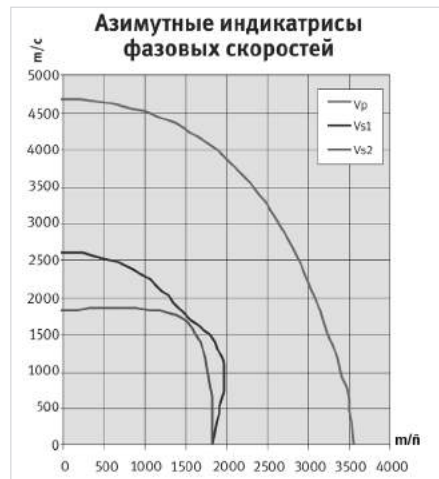


Рис. 2 — Азимутальные индикатрисы фазовых скоростей в трещиноватом слое А. Плотность трещин 2%. Эффективная среда построена по схеме Бэйкуса

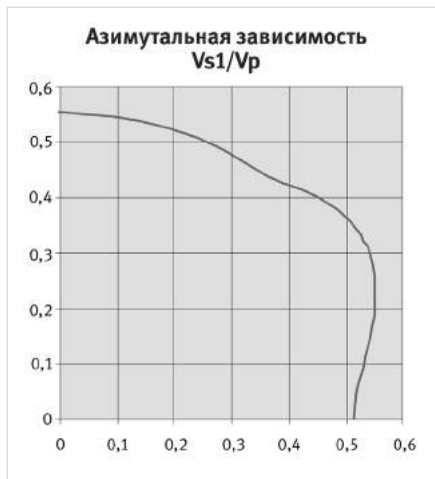


Рис. 3 — Азимутальная индикатриса отношения фазовых скоростей вертикально поляризованной квазипоперечной волны и квазипродольной волны в трещиноватом слое А. Плотность трещин 2%

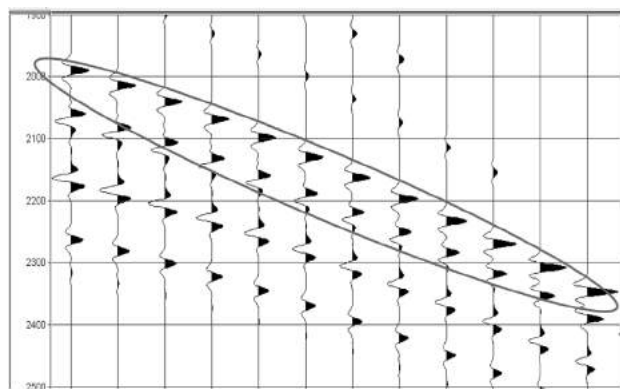


Рис. 4.1 — Плотность трещин 1%, азимут 0.

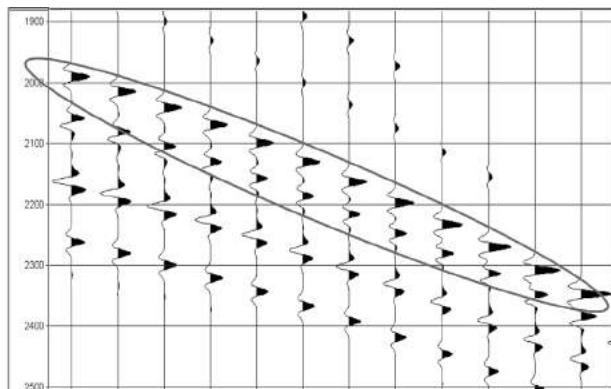


Рис. 4.2 — Плотность трещин 1%, азимут 90.

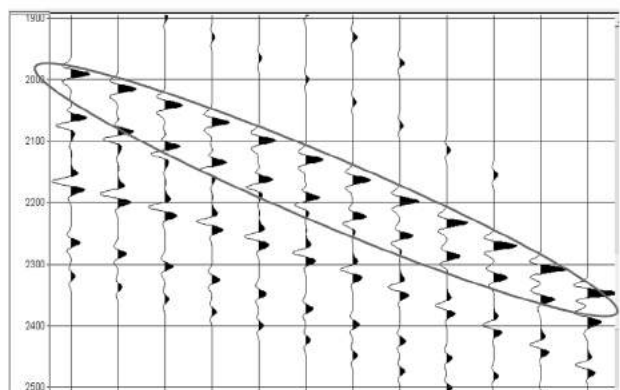


Рис. 4.3 — Плотность трещин 3%, азимут 0.

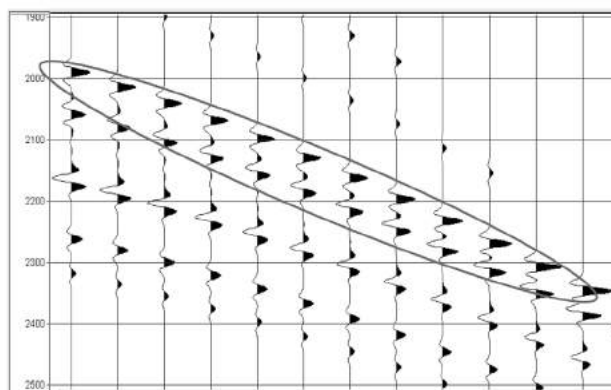


Рис. 4.4 — Плотность трещин 3%, азимут 90.

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

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.

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 ортогональные 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.

Итоги

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.

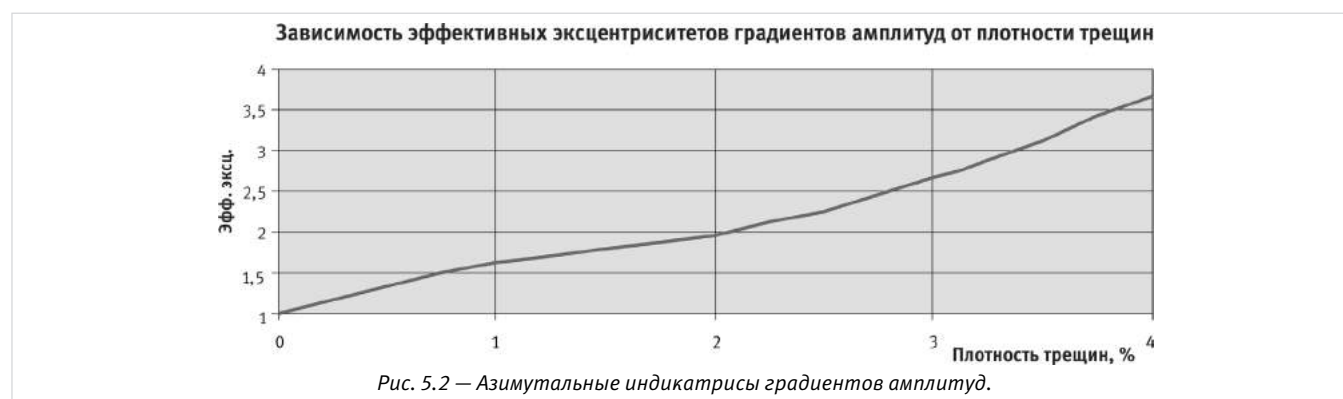
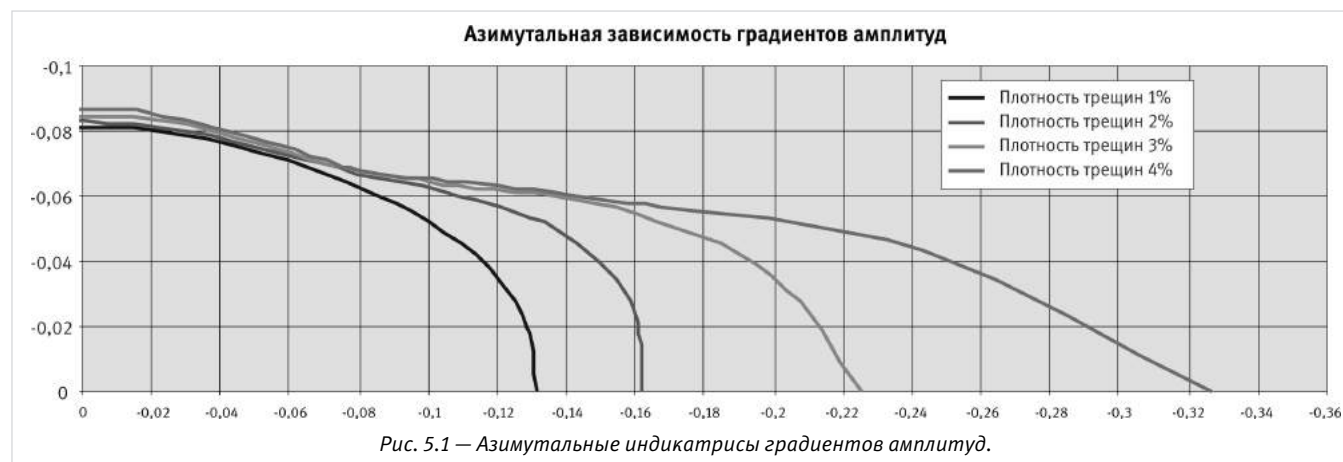
Выводы

- 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 используемой 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. Спец. выпуск к 45-летию ЦГЭ // Геофизика, 2012. С. 28–37.
3. Backus G.E. Long-wave elastic anisotropy produced by horizontal layering. *Geophys. Res.* 1962, 67, pp. 4427–4440.
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. 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, pp. 133–150.
7. Schoenberg M., Muir F. A *Calculus for finely layered anisotropic media*. *Geophysics*, 1989, 54, pp. 581–589.



Characteristics of reflected waves in regular fractured media

Aleksandr G. Averbukh — dr. sc., a leading expert¹; inpres@cge.ru

Sergey Y. Graf — candidate. f.m.n., associate engineer¹; inpres@cge.ru, sergey.Graf@tversu.ru

¹Central Geophysical Expedition JSC, Moscow, Russian Federation

Abstract

The qualitative and quantitative effects of dynamics of waves reflected from fractured collector are analyzed. The azimuth dependences of seismic parameters on crack density, geometrical characteristics of fractures and choose of the type of effective model of fractured media are estimated. The problem of connection of characteristics of effective model of fractured media with the physical properties of fractures is considered. The analytical instrument for the estimation of properties of the fractured media in terms of azimuth variations of seismic characteristics of primary reflected waves is suggested.

Materials and methods

Methods of effective media theory. Methods of numerical modeling of seismic wave fields in anisotropic media.

Results

Numerical modeling of cinematic and dynamic azimuth effects of body waves reflected from fractured reservoirs was realized. Dependence of azimuth anomalies on physical properties of fractures and choose of effective model was analyzed.

Conclusions

- The methodology of determination of seismic characteristics of regularly fractured media in terms of elastic properties of

matrix and fracture fill is proposed.

- An instrument for a numerical modeling of cinematic and dynamic azimuth effects of body waves reflected from fractured layers is developed.
- The methodology of determination of fracture density in terms of effective parameters of azimuth variations of AVO gradients, phase velocities and chosen model of effective media and borehole data is suggested.
- The analytic method of determination of parameters of fractured layer in terms of azimuth variations of seismic characteristics of reflected body waves is proposed.

Keywords

fractured collectors, Seismic anisotropic media, effective model

References

1. Averbukh A.G., Pod'japolsky G.S., Zolotov E.M. *Skorosti rasprostraneniya ploskikh uprugikh voln v osesimmetrichnikh neodnorodnykh sredakh* (Velocities of elastic plane waves in axisymmetric medias) [The velocity of propagation of plane elastic waves in axisymmetric inhomogeneous media]. *Physika Zemli*, 1975, issue 3, pp. 43–51.
2. Graf S.Yu. *Kinematicheskie metody analiza anizotropii seismicheskikh skorostej v*

transversal'no isotropnykh sredakh (Cinematic methods of analysis of anisotropy of seismic velocities in transverse isotropic media) [Kinematic analysis techniques seismic velocity anisotropy in transversely isotropic media. Spec. issue to the 45th anniversary of the CGE]. *Geofisika*, 2012, pp. 28–37.

3. Backus G.E. Long-wave elastic anisotropy produced by horizontal layering. *Geophys. Res.* 1962, 67, pp. 4427–4440.
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. 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, pp. 133–150.
7. Schoenberg M., Muir F. A Calculus for finely layered anisotropic media. *Geophysics*. 1989, 54, pp. 581–589.

ГЕОЛОГИЯ

УДК 550.8.02

Трёхмерное геологическое моделирование с учетом фациальных условий осадконакопления

С.И. Билибин

д.т.н., заместитель ген.директора по новым технологиям¹
sibilibin@cge.ru

Н.Ф. Величина

главный специалист по геологии отделения
Геоинформационных технологий¹
nfvelichkina@cge.ru

А.В. Вовк

начальник отдела геологии отделения
Геоинформационных технологий¹
avvovk@cge.ru

¹ОАО «ЦГЭ», Москва, Россия

Трёхмерное геологическое моделирование с учетом фациальных условий осадконакопления осуществляет переход от качественного уровня знания о месторождении, условиях образования отложений к количественной оценке

Трёхмерное геологическое моделирование стало незаменимым инструментом изучения месторождений УВ, подсчета запасов, фильтрационных расчетов. Объемная модель в доступной форме создает более адекватное представление о геологическом строении месторождения по сравнению с плоскостной двумерной моделью. В настоящее время важная информация по геологическим фациальным условиям осадконакопления в большинстве случаев остается на описательном (качественном) уровне и не участвует в модели и подсчете запасов, так как пока неясен путь технологического решения подобных задач. Создание фациальной модели продуктивных отложений базируется на знаниях, которые в теории классической геологической науки уже давно существуют, и признаны геологическим сообществом.

Основная причина, по которой фациальный анализ практически не используется в практике 3D моделирования, в том, что далеко не на каждом месторождении имеются данные, позволяющие в полной мере провести такой анализ с доведением его до конкретных результатов, которые могли бы быть

технологически учтены при построении 3D-геологической модели.

Вторая причина заключается в том, что для создания фациальных моделей требуется обобщение большого объема информации из различных областей исследований — региональные и локальные геологические сведения, изученный по литологии, седиментации и ФЕС керн, данные ГИС, результаты сейсмической интерпретации, гидродинамических исследований, сведения по разработке месторождений. Только комплексный подход, при котором все имеющиеся данные увязываются в непротиворечивую схему, позволит корректно выполнить фациальный анализ.

Геологическое моделирование начинается с создания концептуальной геологической модели, которая служит основой модели фаций, исходя из знания региональных палеоусловий осадконакопления. Должна быть проделана большая предварительная работа литологов и седиментологов для уточнения фациальных условий конкретного локального изучаемого района работ. Для принципиальной концепции важна информация, которая позволяет от качественного уровня