



Выбор меньшего из зол: построение геофизической модели трещиноватого коллектора по данным сейсморазведки

**Александр Григорьевич Авербух¹, Сергей Юрьевич Граф^{1,2},
Эльвира Раисовна Ахметова¹, Алексей Владимирович Гарнов¹**

¹ОАО Центральная геофизическая экспедиция, г. Москва

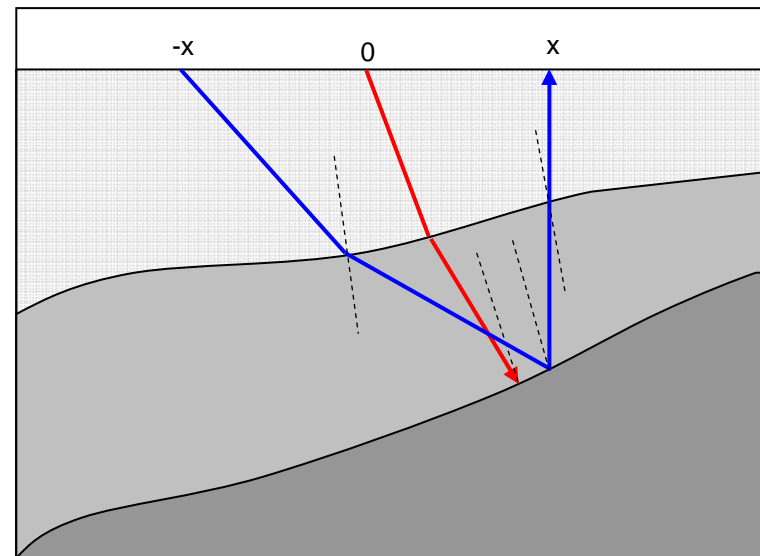
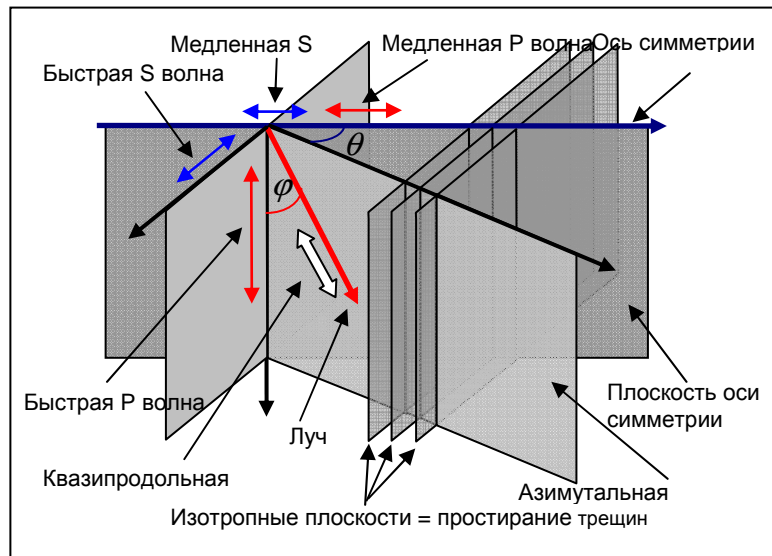
²Тверской государственный университет, г. Тверь

Особенности построения эффективных моделей трещиноватых сред

- рост значения изучения трещиноватых пород, особенно коллекторов
- необходимость выявления трещиноватых зон и оценки их параметров
- направленность стандартного подхода к интерпретации на повышение регулярной составляющей волнового поля
- слабая помехоустойчивость сейсмически определяемых параметров зон структурных нарушений и трещиноватости
- наличие различных моделей, описывающих трещиноватые среды
- в задачах сейсморазведки достаточно ограничиться моделями, в которых трещиноватые среды подменяются эквивалентными им в низкочастотном приближении эффективными средами
- существует риск, что полученная эффективная модель является следствием анизотропных особенностей или низкого качества сейсмической записи
- неоднозначность интерпретации приводит к риску выбора нереалистичных моделей
- верификация построенной геологической модели производится средствами математического моделирования
- необходимость осознанного подхода к выбору геофизической модели и методики интерпретации трещиноватых зон

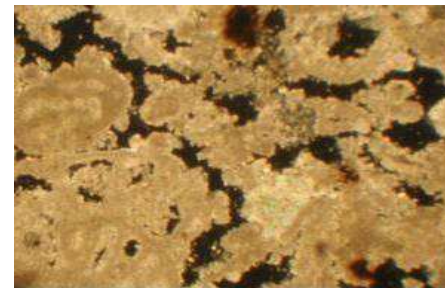
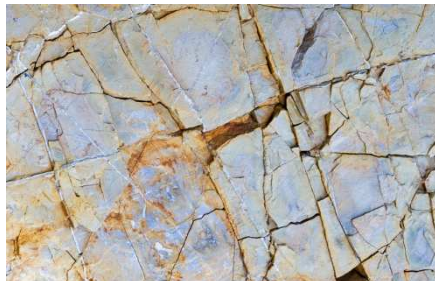
Анизотропные свойства трещиноватых сред

- трещиноватость среды приводит к повышению фона рассеянных колебаний, снижению скоростей, а при наличии доминирующей ориентации трещин - к заметной азимутальной анизотропии скоростей
- Несовпадение волновых фронтов и индикатрис плоских волн приводит к тому, что смещение частиц при движении продольной волны не вполне параллельно лучу, а поперечная волна поляризуется в волны двух типов: вертикально поляризованную квазипоперечную волну (в плоскости оси симметрии) и горизонтально поляризованную поперечную волну (в изотропной плоскости).



Описание трещиноватых сред

- трещиноватые среды, представляющие собой объект исследования сейсморазведки, характеризуются, как правило, следующими параметрами:
- физическими свойствами вмещающей матрицы
- физическими свойствами заполняющей породы или флюида
- преобладающим направлением трещин и/или иерархической структурой трещин, геометрическими свойствами трещин
- интенсивностью трещин, т.е. количеством трещин на единицу длины в направлении, ортогональном преобладающему направлению простирания трещин или количеством трещин на единицу объема
- раскрытостью трещин или средними линейными размерами отдельной трещины в системе
- плотностью трещин, т.е. долей, занимаемой трещинами в единице объема среды или в направлении, ортогональном простиранию трещин



Система параметров Томсена

- анизотропия скоростей распространения волн описывается параметрами Томсена V_0, ε, δ (Thomsen L., Weak elastic anisotropy, *Geophysics*, **51** (1986), 1954–1966).

V_0 – скорость распространения волн в вертикальном направлении.

ε характеризует различие скоростей в направлении оси симметрии и по горизонтали:

$$V_{\pi/2} = V_0 \sqrt{1 + 2\varepsilon} \approx V_0(1 + \varepsilon).$$

γ играет сходную роль для поляризованных поперечных волн.

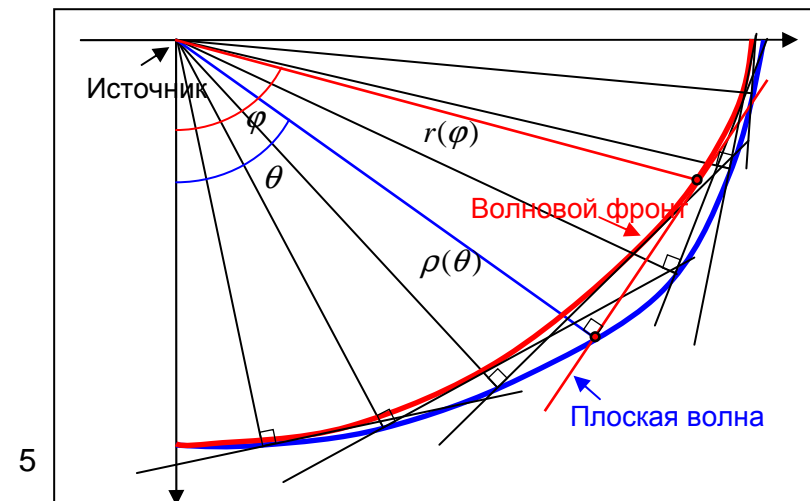
δ характеризует кривизну годографа ОСТ при малых удалениях:

$$\delta = \frac{1}{2V_0} \left. \frac{d^2V(\theta)}{d\theta^2} \right|_{\theta=0}.$$

Скорость распространения продольных волн в слабо анизотропной ВТИ среде

$$V(\theta) \approx V_0(1 + \delta \sin^2 \theta \cos^2 \theta + \varepsilon \sin^4 \theta).$$

- при $\varepsilon = \delta$ – эллиптическая анизотропия

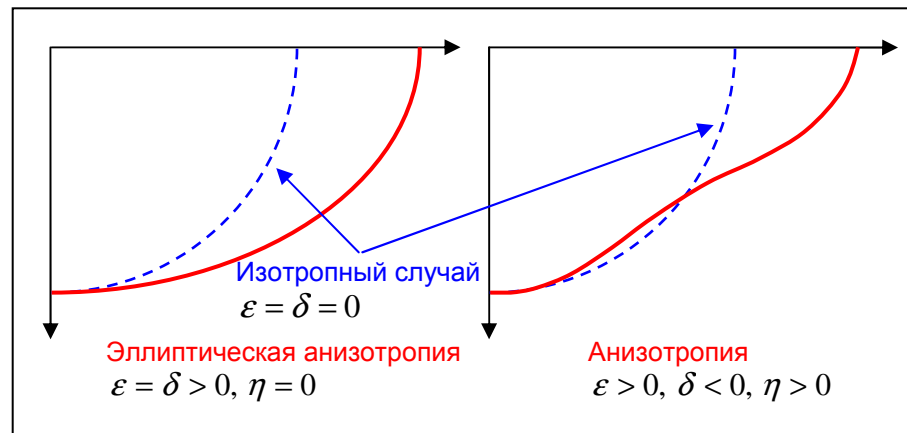


Система параметров Томсена

- отличие индикатрисы скорости (и формы волнового фронта) от эллиптической формы характеризуется параметром

$$\eta = \frac{\varepsilon - \delta}{1 + 2\delta}, \quad V(\theta) \approx V_0(1 + \delta \sin^2 \theta + \eta \sin^4 \theta).$$

η – степень негиперболичности годографов ОСТ и неэллиптичности волнового фронта

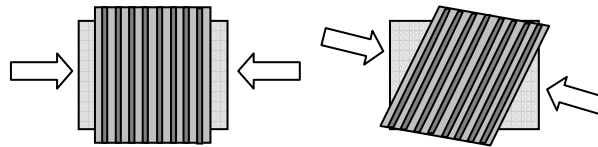


Характерные значения параметров анизотропии для глин, песчаников и карбонатов (В. Гречка)

	ε	δ	η	Характер годографа ОСТ
глина	0.21	0.03	0.19	$\varepsilon \gg \delta$ годограф существенно негиперболичен
карбонат	0.03	0.01	0.03	$\varepsilon > \delta$ годограф негиперболичен
песчаник	0.07	0.05	0.02	$\varepsilon \approx \delta$ годограф почти гиперболичен

Принципы теории эффективных сред

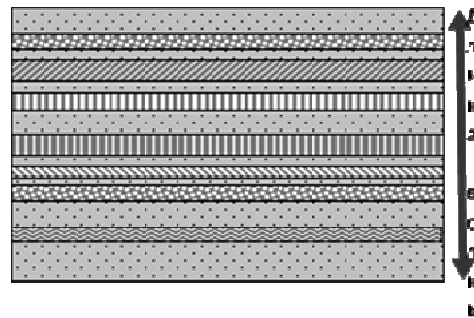
- в задачах сейсморазведки достаточно ограничиться моделями, в которых трещиноватые среды подменяются эквивалентными им в низкочастотном приближении эффективными средами
- геометрически анизотропия проявляется в различной реакции среды на направленные деформации:



- напряжения и деформации в среде определяются законом Гука: $\sigma = C\varepsilon$, ε - вектор деформации, σ - вектор напряжений, а C - тензор жесткости
- тензор C представлен двумерной матрицей с 36 компонентами. В силу симметричности матрицы независимыми в общем случае являются лишь 21 компонента
- с появлением какого-либо типа симметрии свойств (скоростей) в среде число независимых компонент тензора C снижается. В осесимметрических (трансверсально изотропных средах) таких компонент 5, а в изотропном случае – лишь 2 константы Ляме, определяющие скорости продольных и поперечных волн.

Обзор моделей теории эффективных сред: метод Бэйкуса

- **Метод Бэйкуса** (Backus G. E., Long-wave elastic anisotropy produced by horizontal layering, *J. Geophys. Res.*, **67** (1962), 4427–4440)
- эффективные модели, эквивалентные системам тонких изотропных параллельных слоев с условием стационарности



- процедура осреднения Бэйкуса использовалась впоследствии многими авторами и была обобщена М. Шоенбергом (Schoenberg M., Douma J., Elastic wave propagation in media with parallel fractures and aligned cracks, *Geophysical prospecting*, **26** (1988), 571–590) на случай систем тонких анизотропных слоев
- метод Бэйкуса-Шоенберга позволяет строить эффективные анизотропные среды, эквивалентные трещиноватым с произвольным набором разнонаправленных систем трещин

Обзор моделей теории эффективных сред: метод Бэйкуса

Осреднение Бэйкуса-Шоенберга

$$\begin{aligned}
 \tilde{\mathbf{C}}_{NN} &= \langle \mathbf{C}_{NN,k}^{-1} \rangle^{-1}, & \tilde{\mathbf{C}}_{TN} &= \langle \mathbf{C}_{TN,k} \mathbf{C}_{NN,k}^{-1} \rangle \langle \mathbf{C}_{NN,k}^{-1} \rangle^{-1}, \\
 \tilde{\mathbf{C}}_{TT} &= \langle \mathbf{C}_{TT,k} \rangle - \langle \mathbf{C}_{TN,k} \mathbf{C}_{NN,k}^{-1} \mathbf{C}_{NT,k} \rangle + \langle \mathbf{C}_{TN,k} \mathbf{C}_{NN,k}^{-1} \rangle \langle \mathbf{C}_{NN,k}^{-1} \rangle^{-1} \langle \mathbf{C}_{NN,k}^{-1} \mathbf{C}_{NT,k} \rangle, \\
 \langle x \rangle &= \sum_{k=1}^N x_k h_k / \sum_{k=1}^N h_k
 \end{aligned}$$

$$\mathbf{C}_{NN} = \begin{pmatrix} C_{33} & C_{34} & C_{35} \\ C_{34} & C_{44} & C_{45} \\ C_{35} & C_{45} & C_{55} \end{pmatrix}, \quad \mathbf{C}_{TN} = \begin{pmatrix} C_{13} & C_{14} & C_{15} \\ C_{23} & C_{24} & C_{25} \\ C_{36} & C_{46} & C_{56} \end{pmatrix}, \quad \mathbf{C}_{TT} = \begin{pmatrix} C_{11} & C_{12} & C_{16} \\ C_{12} & C_{22} & C_{26} \\ C_{16} & C_{26} & C_{66} \end{pmatrix}.$$

- путем вращения системы координат можно реализовать осреднение Шоенберга в произвольном направлении, что дает возможность включать в модель несколько разнонаправленных систем трещин различной плотности
- процедура осреднения Бэйкуса для набора вертикальных слоев приводит к эффективной трансверсально-изотропной среде с горизонтальной осью симметрии (горизонтально трансверсально-изотропной среде)

Обзор моделей теории эффективных сред: метод Бэйкуса, связь с физическими параметрами среды

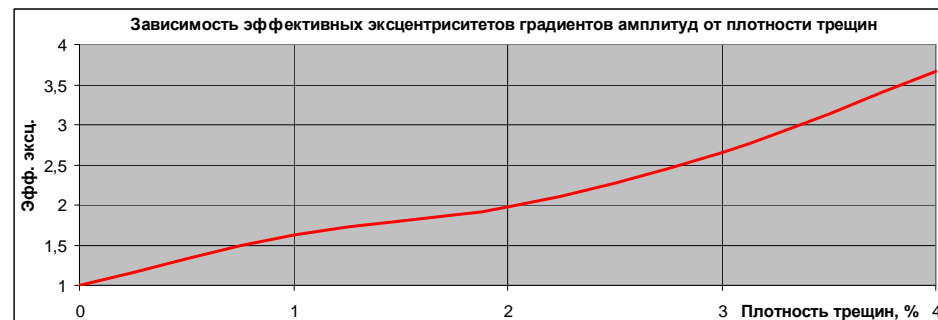
- авторами получены явные зависимости, позволяющие находить компоненты эффективного тензора жесткости по значениям скоростей и плотностей во вмещающей матрице и в трещинах

$$C_{11} = \left\langle \frac{1}{\rho v_P^2} \right\rangle^{-1} = \rho v_P^2 \left(1 - d \left(1 - \frac{\rho v_P^2}{\hat{\rho} \hat{v}_P^2} \right) \right)^{-1}, \quad C_{44} = \langle \rho v_S^2 \rangle = \rho v_S^2 \left(1 - d \left(1 - \frac{\hat{\rho} \hat{v}_S^2}{\rho v_S^2} \right) \right), \quad C_{55} = \left\langle \frac{1}{\rho v_S^2} \right\rangle^{-1} = \rho v_S^2 \left(1 - d \left(1 - \frac{\rho v_S^2}{\hat{\rho} \hat{v}_S^2} \right) \right)^{-1},$$

$$C_{33} = \langle \rho v_P^2 \rangle - \left\langle \frac{\rho (v_P^2 - 2v_S^2)^2}{v_P^2} \right\rangle + \left\langle 1 - 2 \frac{v_S^2}{v_P^2} \right\rangle^2 \left\langle \frac{1}{\rho v_P^2} \right\rangle^{-1} = \rho v_P^2 \left\{ 1 - 4d(1-d) \frac{v_S^2}{v_P^2} \left(1 - \frac{\hat{\rho} \hat{v}_S^2}{\rho v_S^2} \right) \left(1 - \frac{\hat{v}_S^2}{\hat{v}_P^2} - \frac{\rho v_P^2}{\hat{\rho} \hat{v}_P^2} \left(1 - \frac{v_S^2}{v_P^2} \right) \right) \right\} \left(1 - d \left(1 - \frac{\rho v_P^2}{\hat{\rho} \hat{v}_P^2} \right) \right)^{-1},$$

$$C_{13} = \left\langle \frac{1}{\rho v_P^2} \right\rangle^{-1} \left(1 - 2 \left\langle \frac{v_S^2}{v_P^2} \right\rangle \right) = \rho v_P^2 \left\{ 1 - 2 \frac{v_S^2}{v_P^2} \left(1 - d \left(1 - \frac{\hat{v}_S^2 v_P^2}{\hat{v}_P^2 v_S^2} \right) \right) \right\} \left(1 - d \left(1 - \frac{\rho v_P^2}{\hat{\rho} \hat{v}_P^2} \right) \right)^{-1}, \quad C_{23} = 2C_{44} - C_{33},$$

- где 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
- процедура позволяет строить эффективные модели трещиноватых сред с произвольным набором направлений трещин
- метод Бэйкуса-Шоэнберга позволяет проследить связь свойств эффективной модели с физическими параметрами трещиноватой среды



Обзор моделей теории эффективных сред: модель линейного проскальзывания, методы Хадсона, Шоенберга, Молоткова, Бакулина, Качанова, Сайерса

- на основе процедуры осреднения Бэйкуса М. Шоенбергом (Schoenberg M., Douma J., *Elastic wave propagation in media with parallel fractures and aligned cracks*, *Geophysical prospecting*, **26** (1988), 571–590) предложена модель описания трещиноватых сред, известная как **модель плоских параллельных трещин с условием линейного проскальзывания**
- тензор жесткости эффективной трещиноватой среды имеет вид $C = C_b - C_f$, где C_b – тензор жесткости вмещающей изотропной среды, а C_f – дополнительный тензор жесткости, определяемый свойствами трещин

$$C_f = \begin{pmatrix} (\lambda+2\mu)\Delta_N & \lambda\Delta_N & \lambda\Delta_N & 0 & 0 & 0 \\ \lambda\Delta_N & \lambda^2(\lambda+2\mu)^{-1}\Delta_N & \lambda^2(\lambda+2\mu)^{-1}\Delta_N & 0 & 0 & 0 \\ \lambda\Delta_N & \lambda^2(\lambda+2\mu)^{-1}\Delta_N & \lambda^2(\lambda+2\mu)^{-1}\Delta_N & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & \mu\Delta_T & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & \mu\Delta_T \end{pmatrix},$$

- Дж. Хадсоном (Hudson J. A. *Wave speeds and attenuation of elastic waves in material containing cracks* // *Geophys. J. Roy. Astr. Soc.*, 1981. 64. P. 133 – 150) предложена модель монетообразных трещин. Трещины в среде представлены системой изолированных параллельных эллипсоидов в изотропной вмещающей матрице. Эллипсоиды характеризуются отношением $\alpha = a/c$ наибольшей и наименьшей полуосей, а также параметром плотности трещин, определяемым как $e = N \cdot [a^3]$, где N – количество трещин на единицу объема, а $[a^3]$ обозначает среднее по объему значение куба большой полуоси.

Обзор моделей теории эффективных сред: модель монетообразных трещин

- модели Шоенберга и Хадсона приводят к однотипным тензорам жесткости эффективных сред. Связь между этими моделями позволяет определять компоненты дополнительного тензора жесткости c_f в терминах параметров монетообразных трещин по формулам

$$\Delta_N = \frac{4e}{3g(1-g) \left(1 + \frac{1}{\pi g(1-g)} \frac{\hat{k} + 4/3\hat{\mu} a}{\mu c} \right)},$$

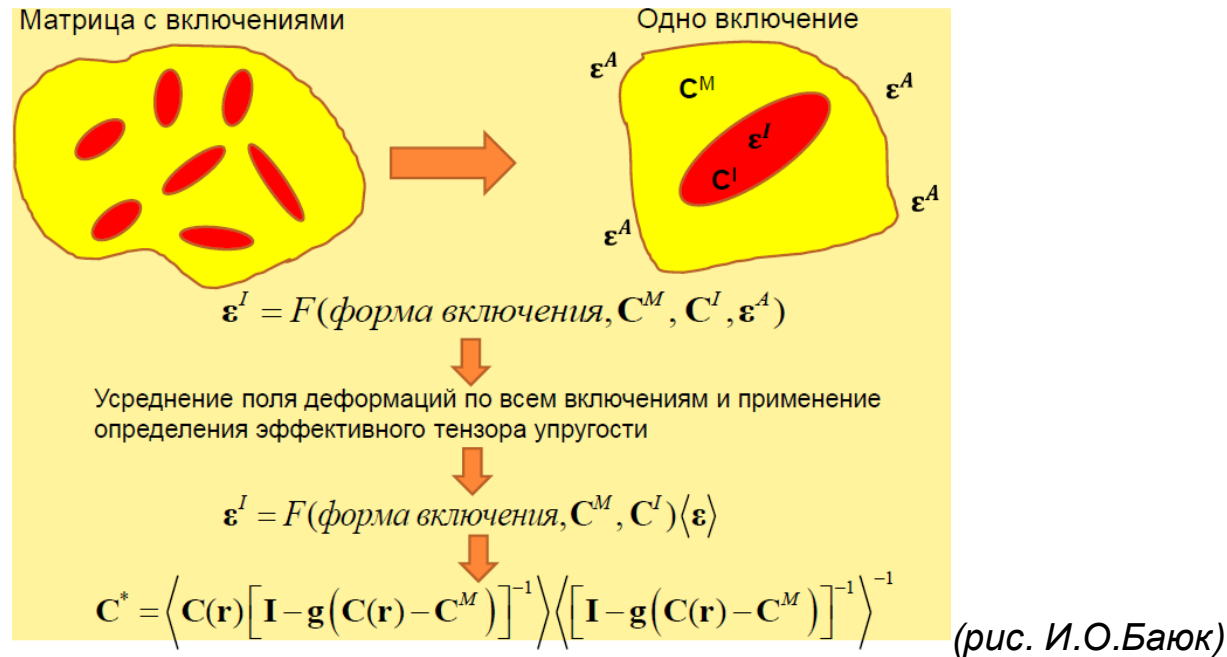
$$\Delta_T = \frac{16e}{3(3-2g) \left(1 + \frac{4}{\pi(3-2g)} \frac{\hat{\mu} a}{\mu c} \right)},$$

где $g = \frac{v_S^2}{v_P^2}$, $\hat{\mu}$, \hat{k} – значения модуля сдвига и объемного модуля упругости для заполнителя.

- при заполнении трещин флюидом $\Delta_N \approx 0$, $\Delta_T = \frac{16e}{3(3-2g)}$.
- модель монетообразных трещин Хадсона допускает обобщение на случай взаимодействующих трещин, предполагающий перетекание флюида и наличие сферических пор.
- 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.

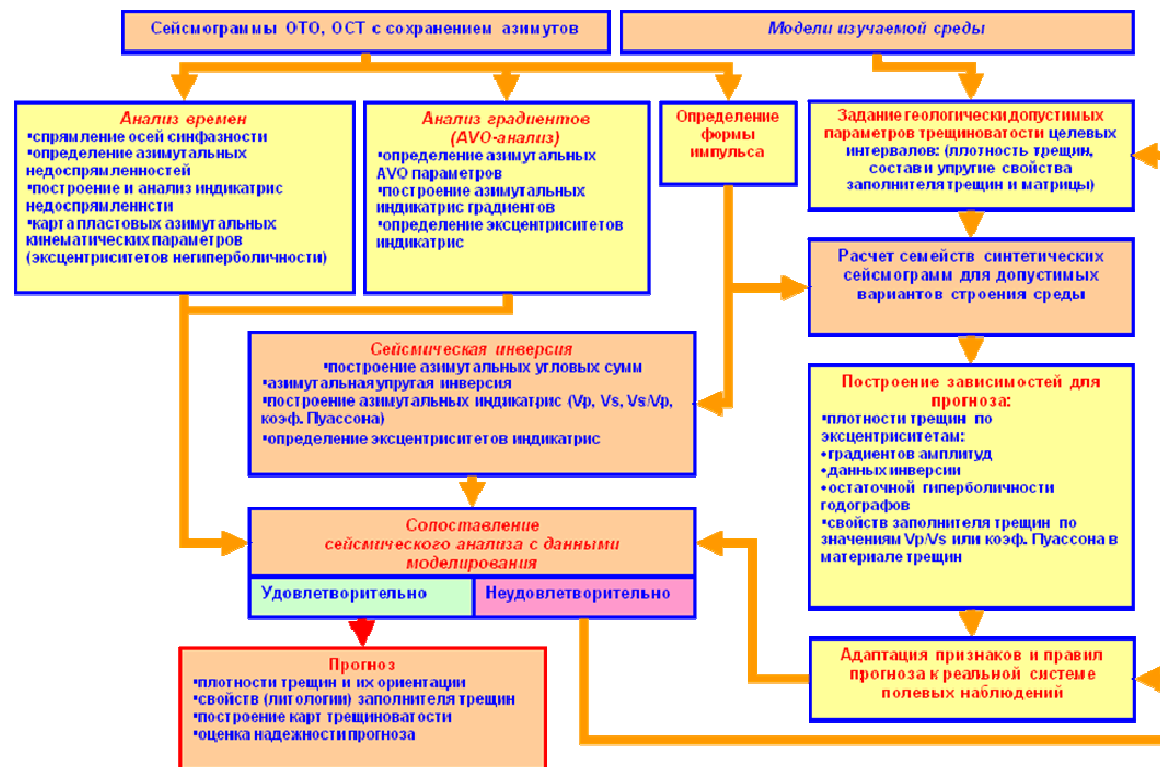
Обзор моделей теории эффективных сред: самосогласованные модели, Эшелби, Шермергор, Баюк

- метод основан на полученном Дж. Эшелби (Eshelby J. D., The determination of the elastic field of an ellipsoidal inclusions and related problems, *Proceedings of the Royal Society of London. Series A*, **241** (1957), 376–396) решении для эллипсоидального включения в произвольную среду
- эффективная модель получена Т. Шермергором (Шермергор Т. Д., Теория упругости микронеоднородных сред, М.: Наука, 1977, 400 с), а впоследствии И.О.Баюк (Баюк И.О., Теоретические основы определения эффективных физических свойств коллекторов углеводородов, *Акустика неоднородных сред, Ежегодник РАО*, **12** (2011), 107-120)



Методология анализа сейсмички в комплексе ИНПРЕС

- выявление зон с благоприятными геологическими предпосылками трещиноватости
- анализ кинематических и динамических характеристик сейсмической записи
- выявление аномальных зон по диагностическим признакам трещиноватости
- оценка параметров трещиноватости
- математическое сейсмо моделирование как инструмент поиска допустимых параметров трещиноватости и проверки результатов интерпретации



Подбор параметров эффективной модели

- 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),
 - геологические характеристики (кривизна границ, разломы и т.д.) целевого интервала.
- результатом построения эффективной модели среды является тензор жесткости (Авербух А.Г., Граф С.Ю., Свойства отраженных волн в регулярно трещиноватых средах, *Экспозиция Нефть Газ*, 2 (34) (2014), 19–22).
- набор азимутальных сейсмограмм ОСТ средствами системы ИНПРЕС-ПРОГНОЗ сравнивается с реальными данными. При необходимости производится коррекция модели и повторное моделирование
- результатом итеративной процедуры построения эффективной модели трещиноватой зоны становится множество значений допустимых параметров модели.

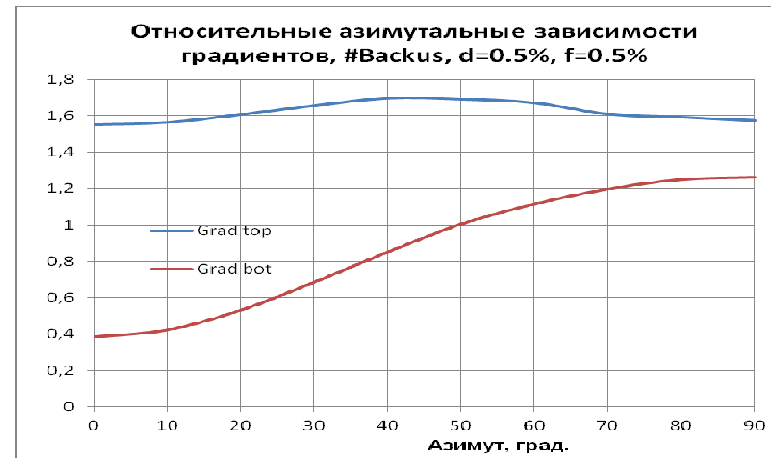
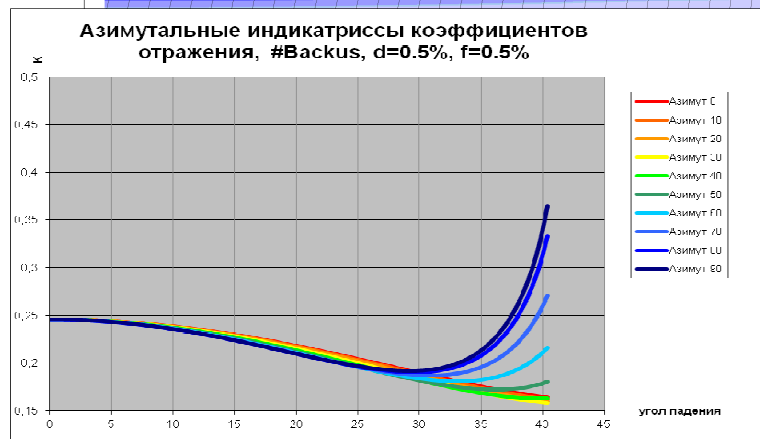
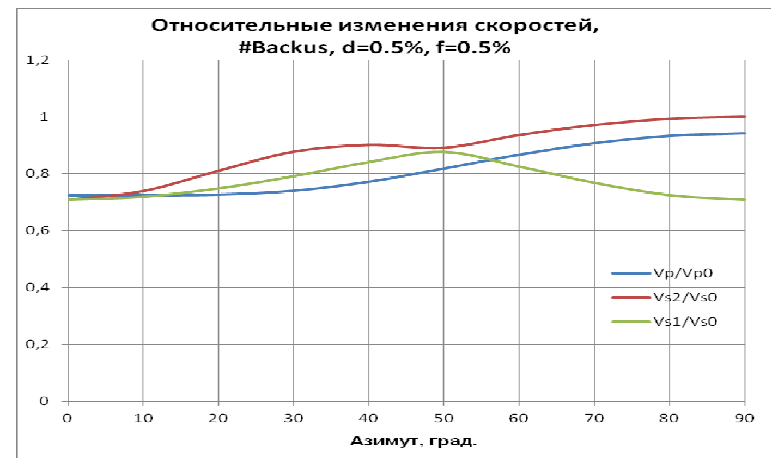
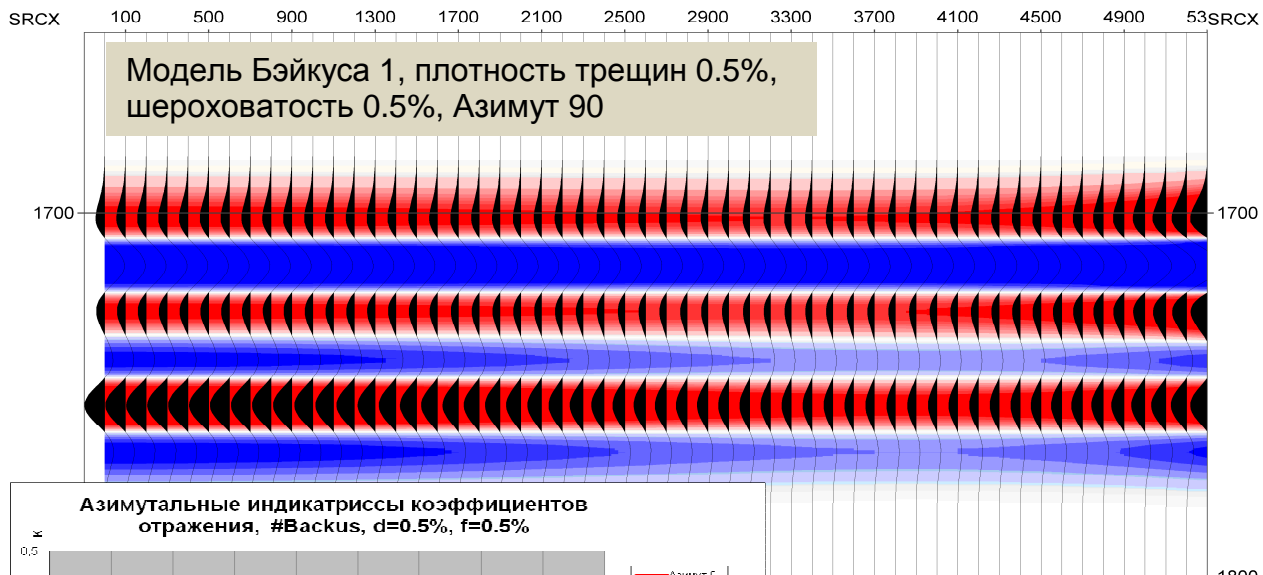
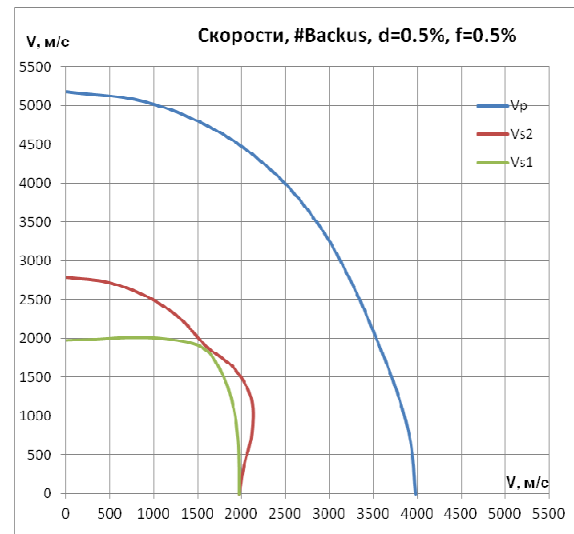
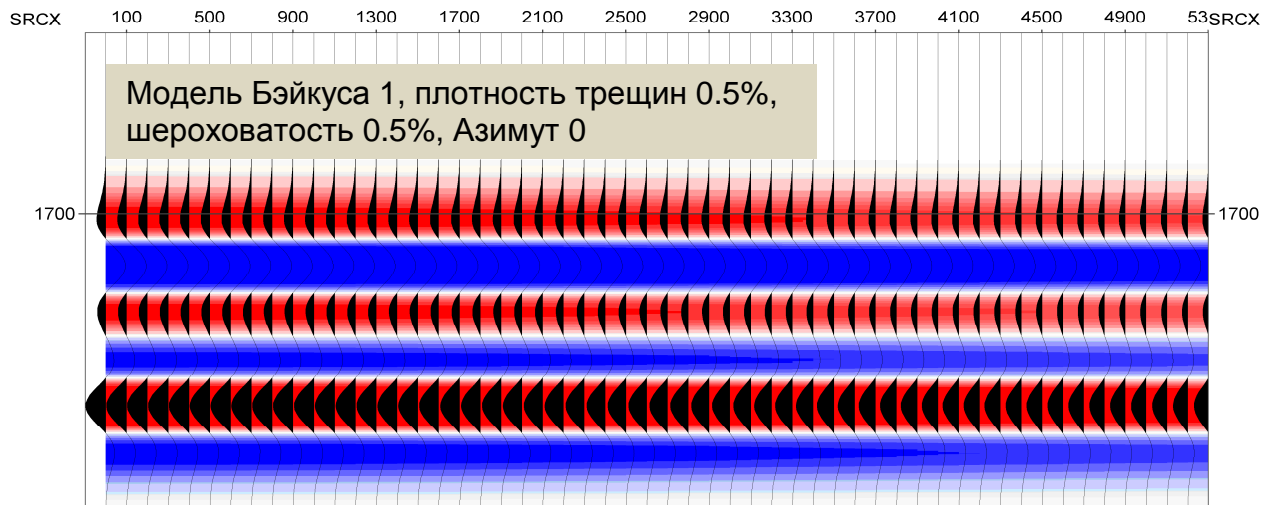
Сравнение эффективных моделей трещиноватого карбонатного коллектора

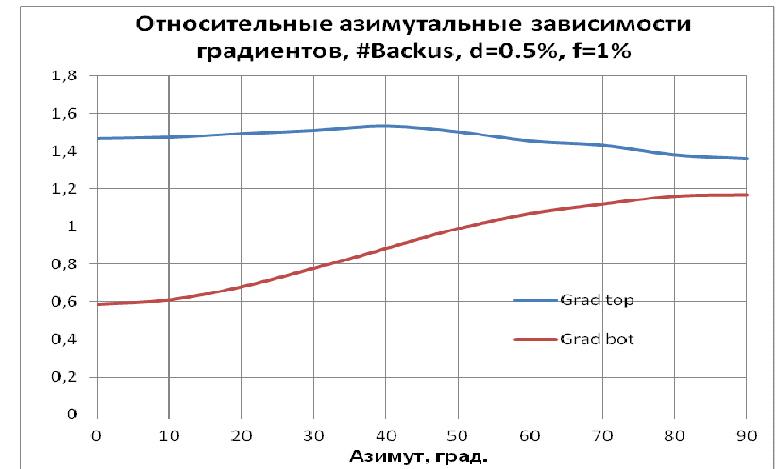
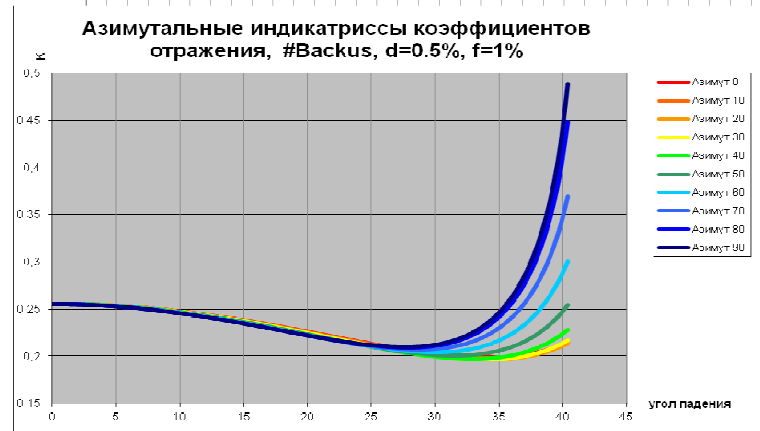
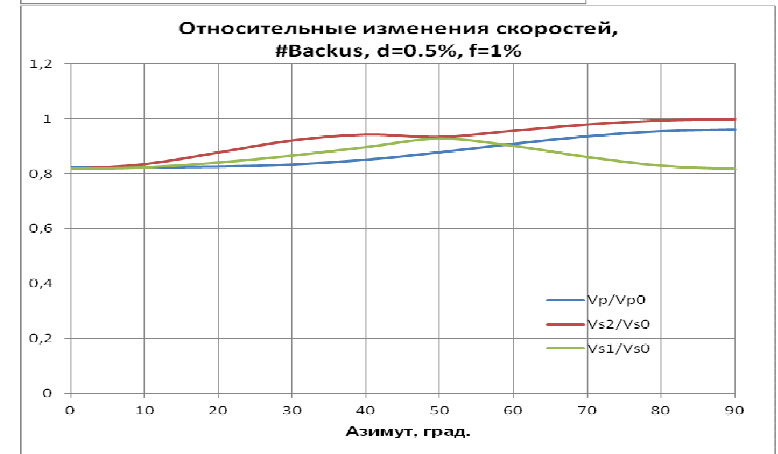
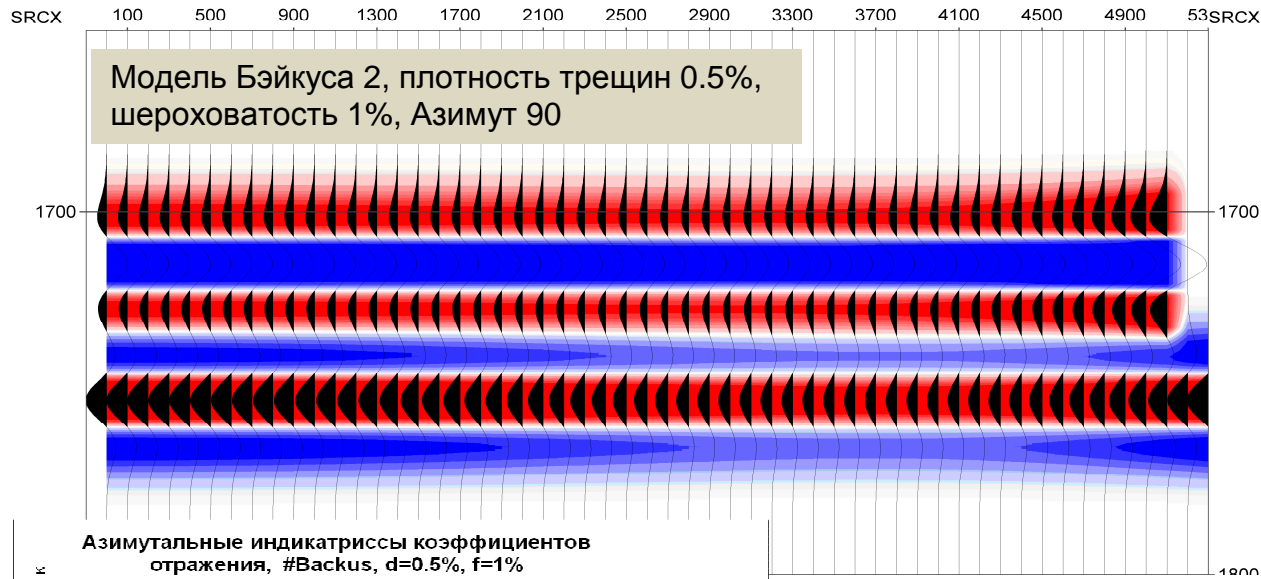
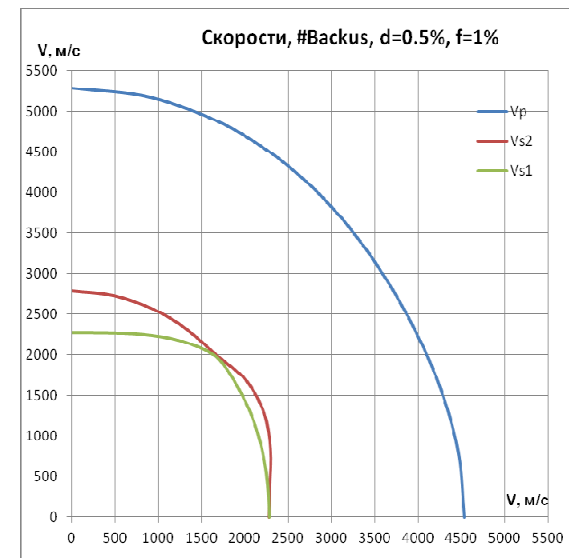
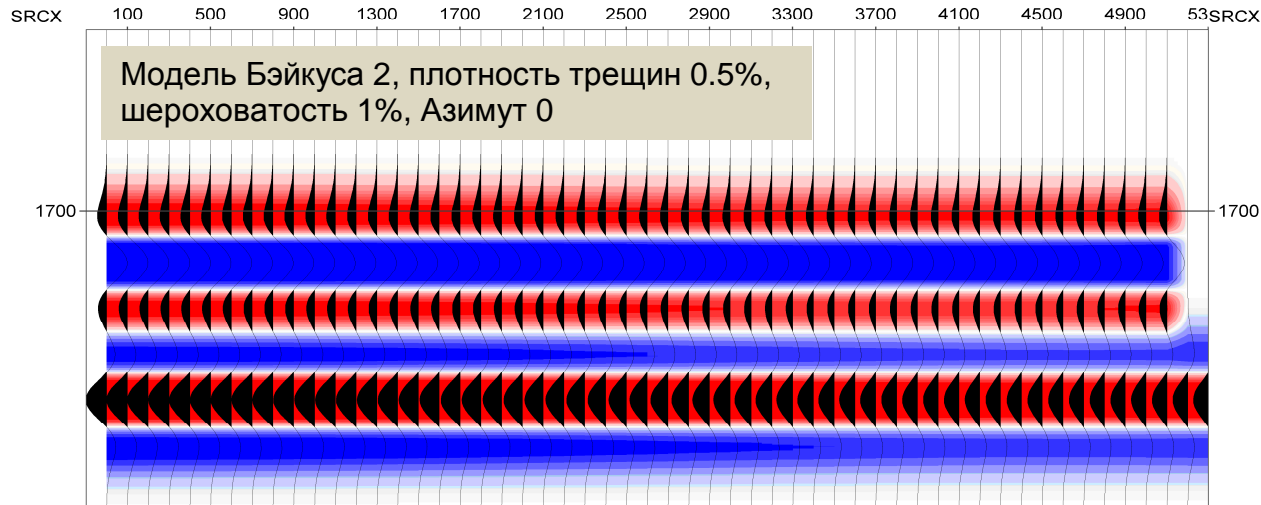
- модель трещиноватого коллектора
- для оценки азимутальных эффектов, вызванных трещиноватостью, была рассмотрена идеализированная трехмерная модель, образованная тремя пластами, имитирующими изотропные покрывающую и подстилающую толщи, а также расположенный между ними трещиноватый анизотропный коллектор

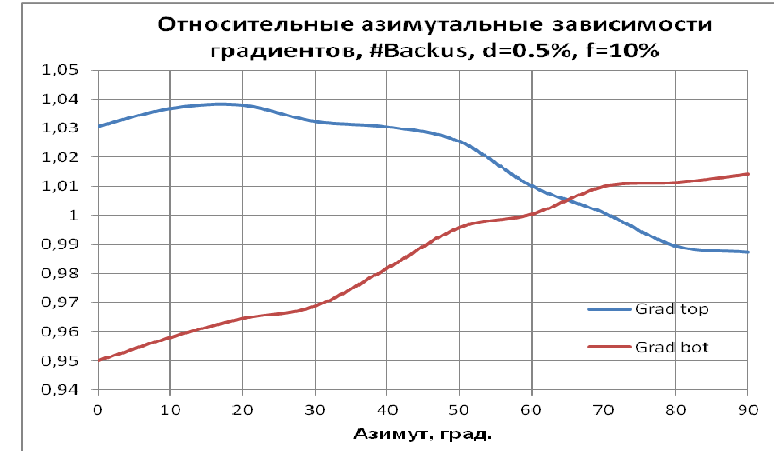
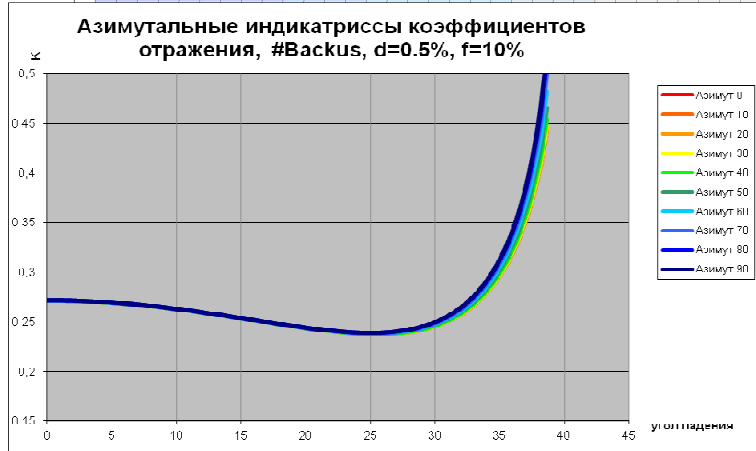
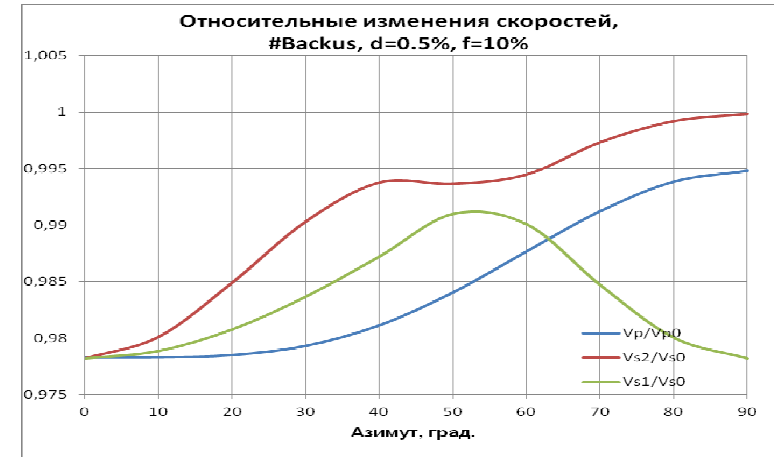
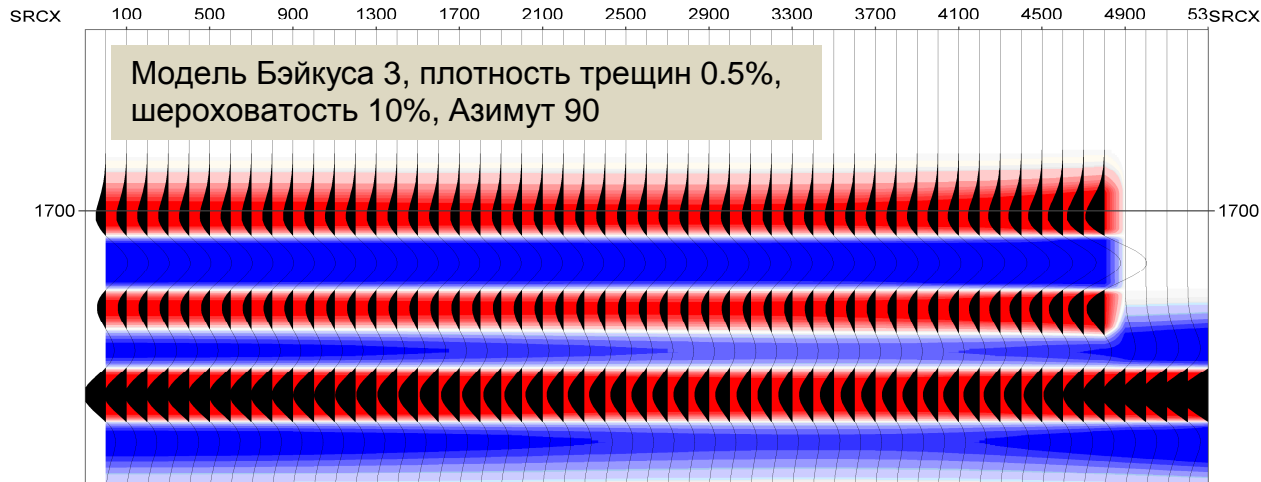
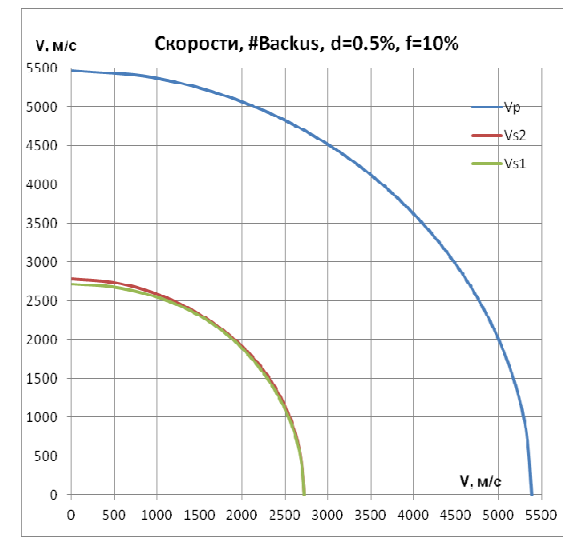
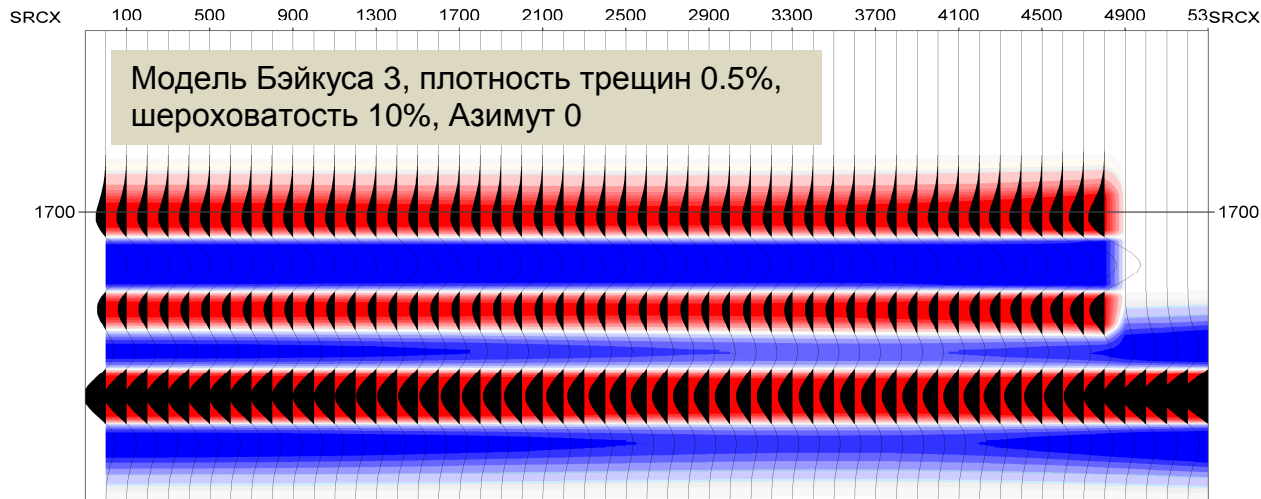
Вмещающие породы	Скорость продольных волн, м/с		Скорость поперечных волн, м/с		Плотность, г/см ³	
	Терригенный коллектор	Карбонатный коллектор	Терригенный коллектор	Карбонатный коллектор	Терригенный коллектор	Карбонатный коллектор
Покрывающая толща	2500	3500	1228	1742	2.3	2.38
Вмещающая матрица	3000	5500	1482	2782	2.4	2.67
Подстилающая толща	3500	3500	1742	2262	2.5	2.38

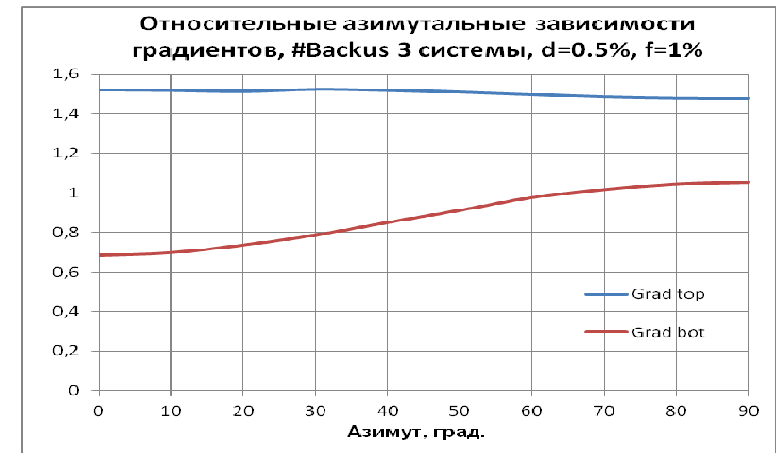
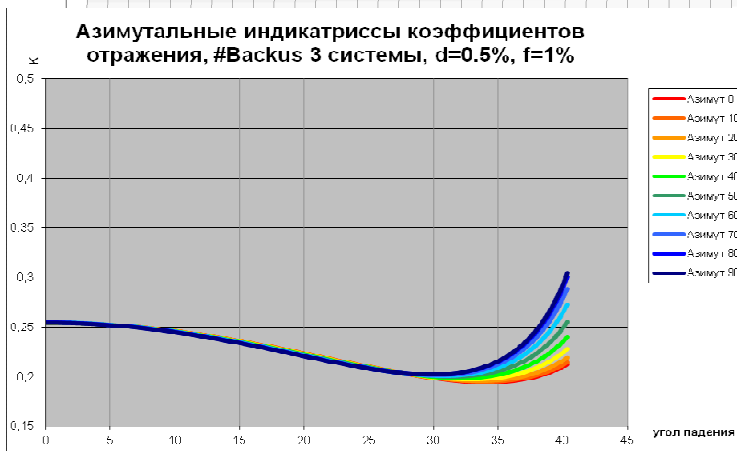
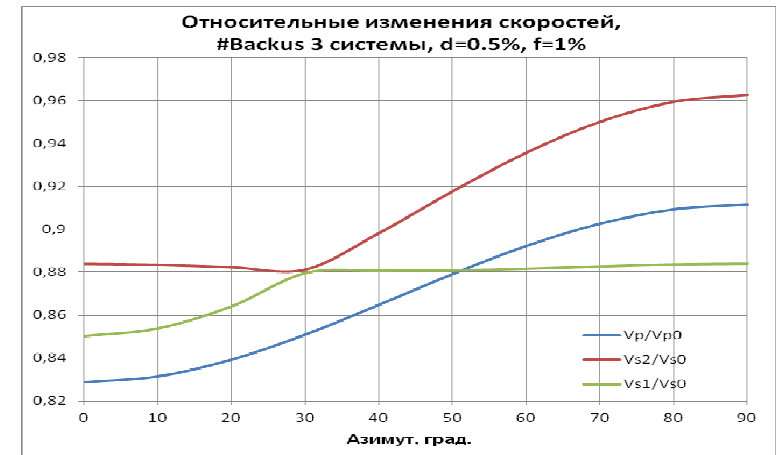
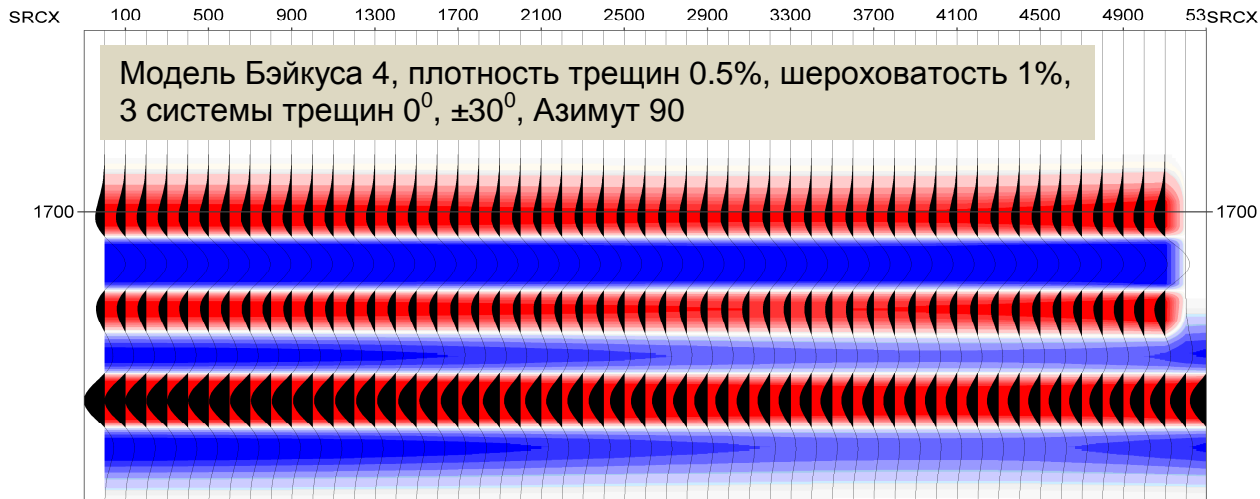
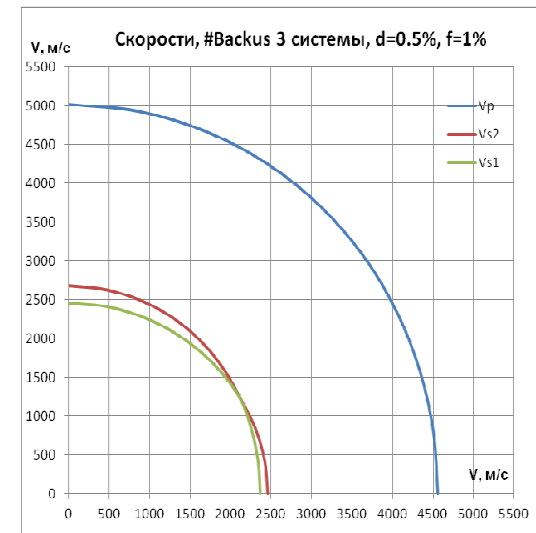
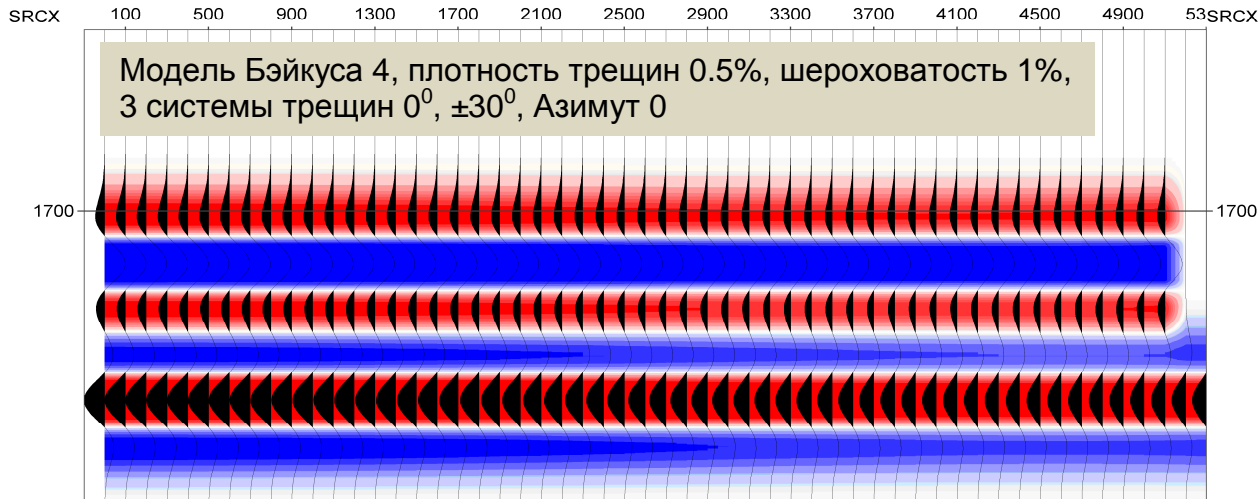


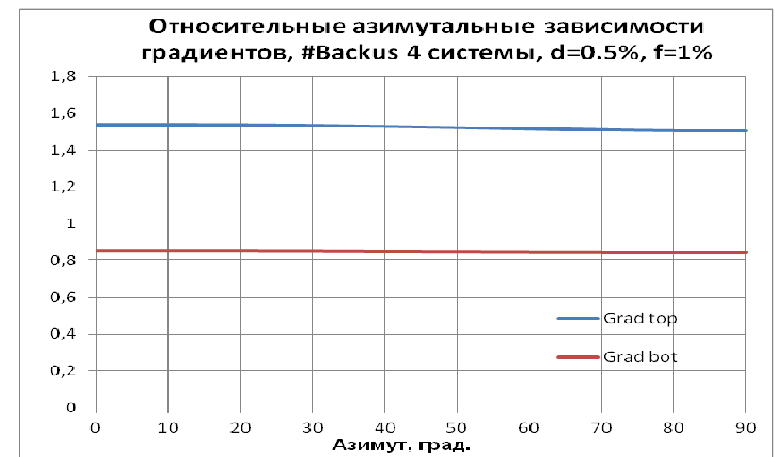
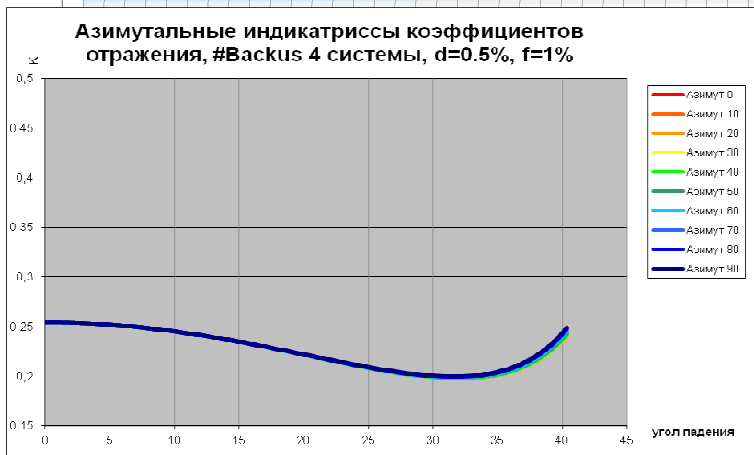
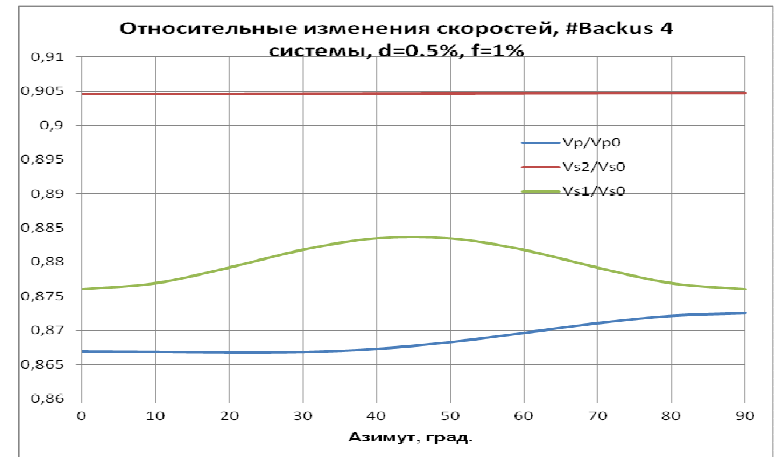
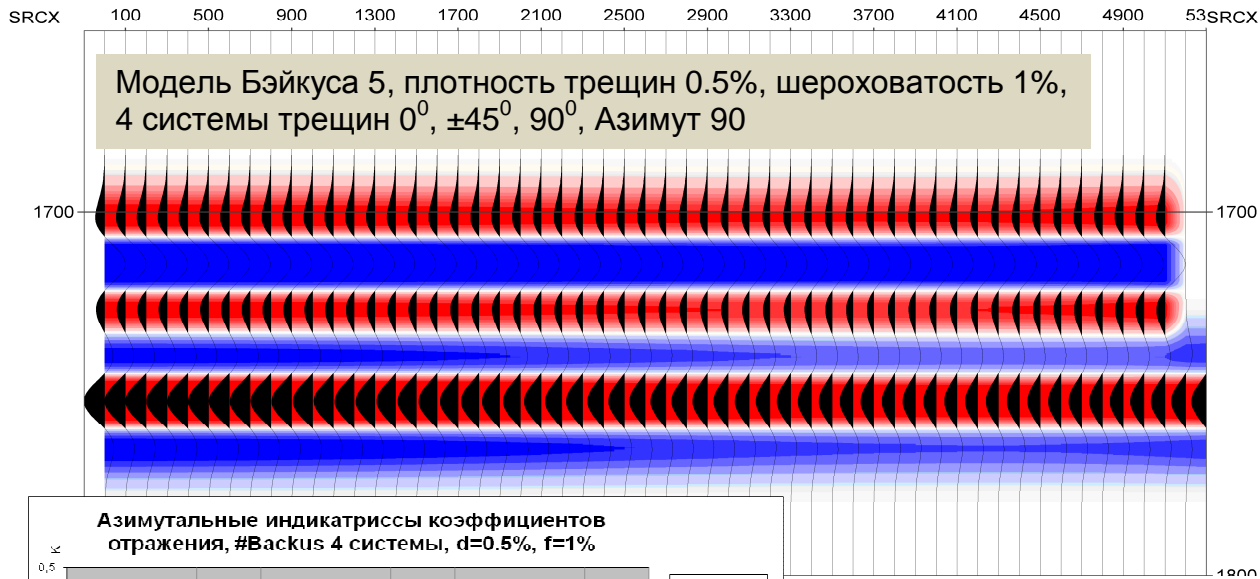
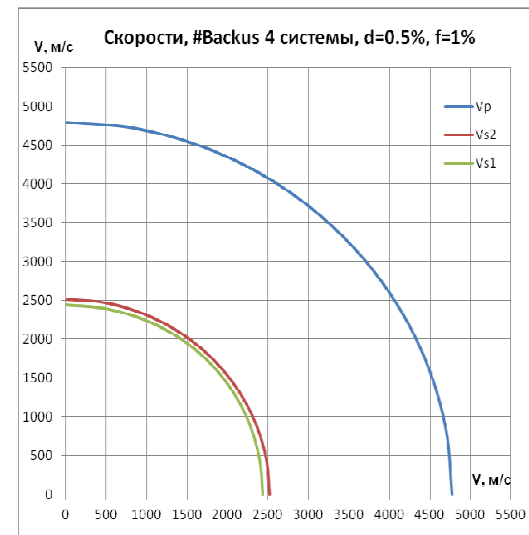
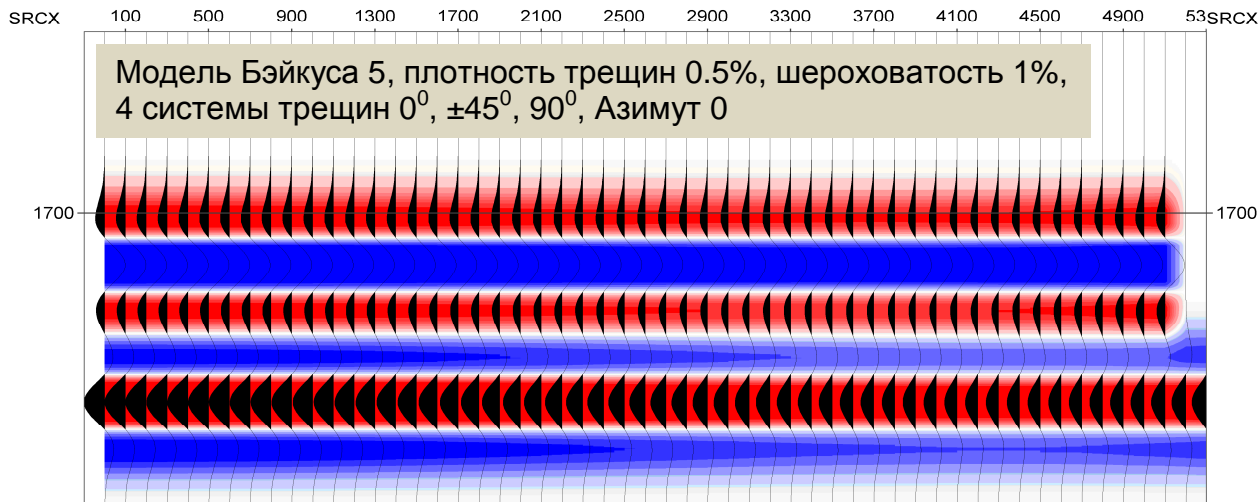
- коллектор наделялся одной или несколькими системами трещин различной направленности и характеризовался эффективным тензором жесткости в соответствии с одной из описанных выше схем.
- степень трещиноватости коллектора определялась плотностью трещин – процентом, занимаемым трещинами во вмещающей матрице (от 0.1% до 2%)
- в ходе моделирования были получены азимутальные зависимости кинематических (пластовая скорость, скорость суммирования) и динамических (коэффициенты отражения квазипродольных волн и их градиенты) атрибутов для различных значений плотности трещин, различного типа заполнителей (вода, газ, нефть) и методов формирования эффективной среды

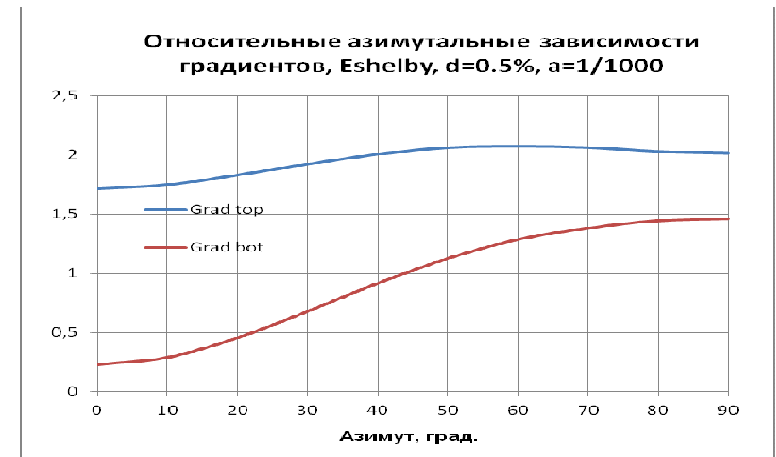
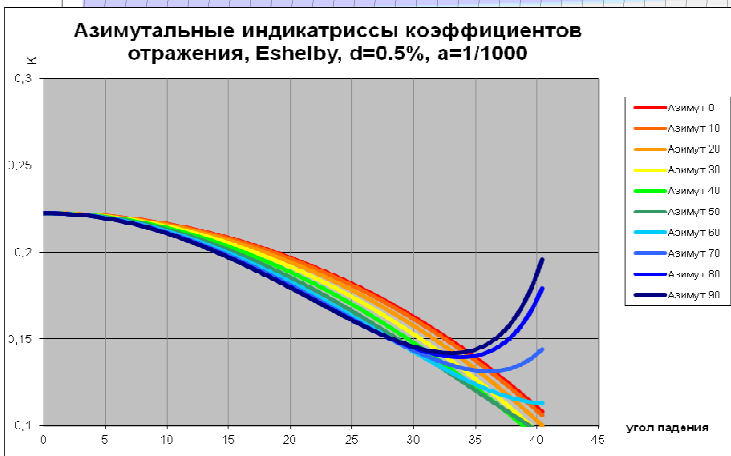
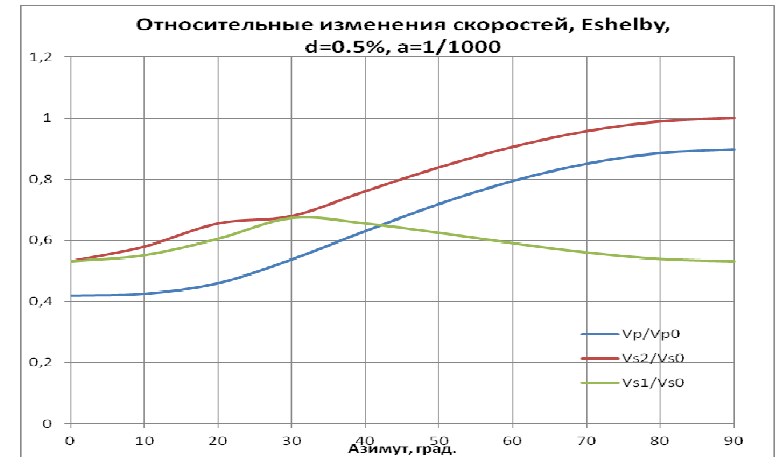
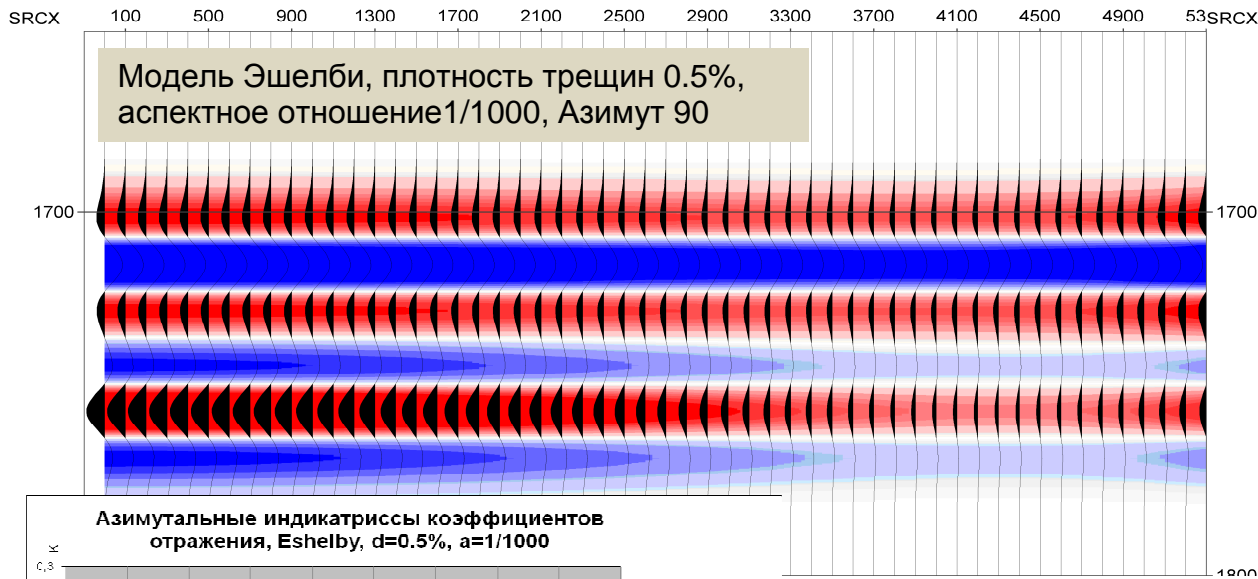
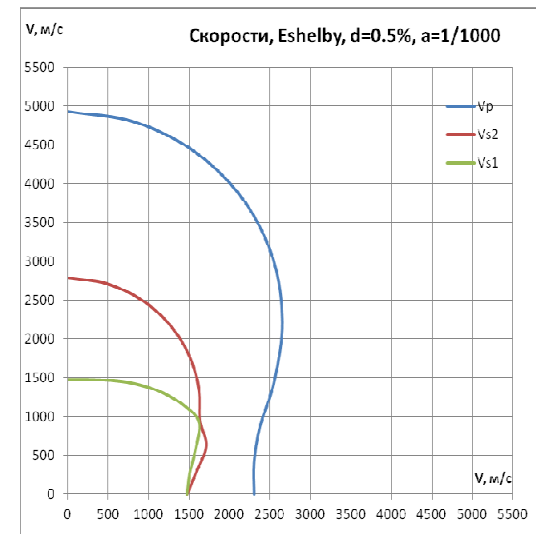
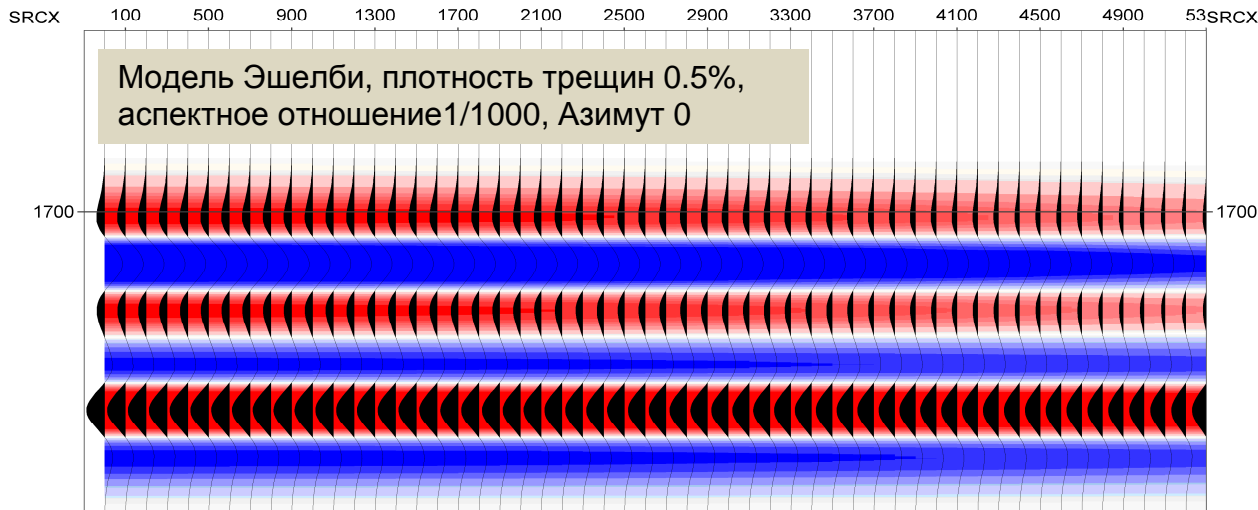




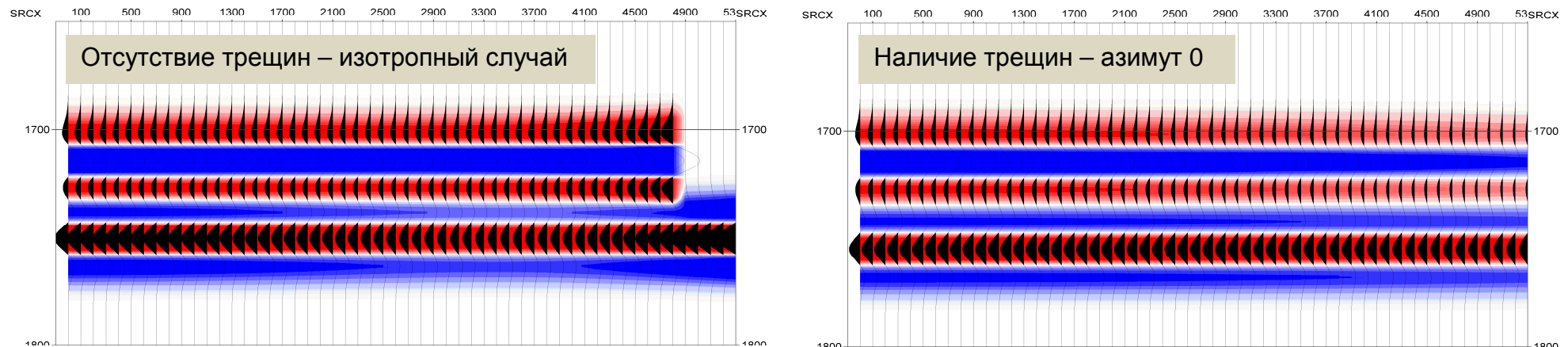








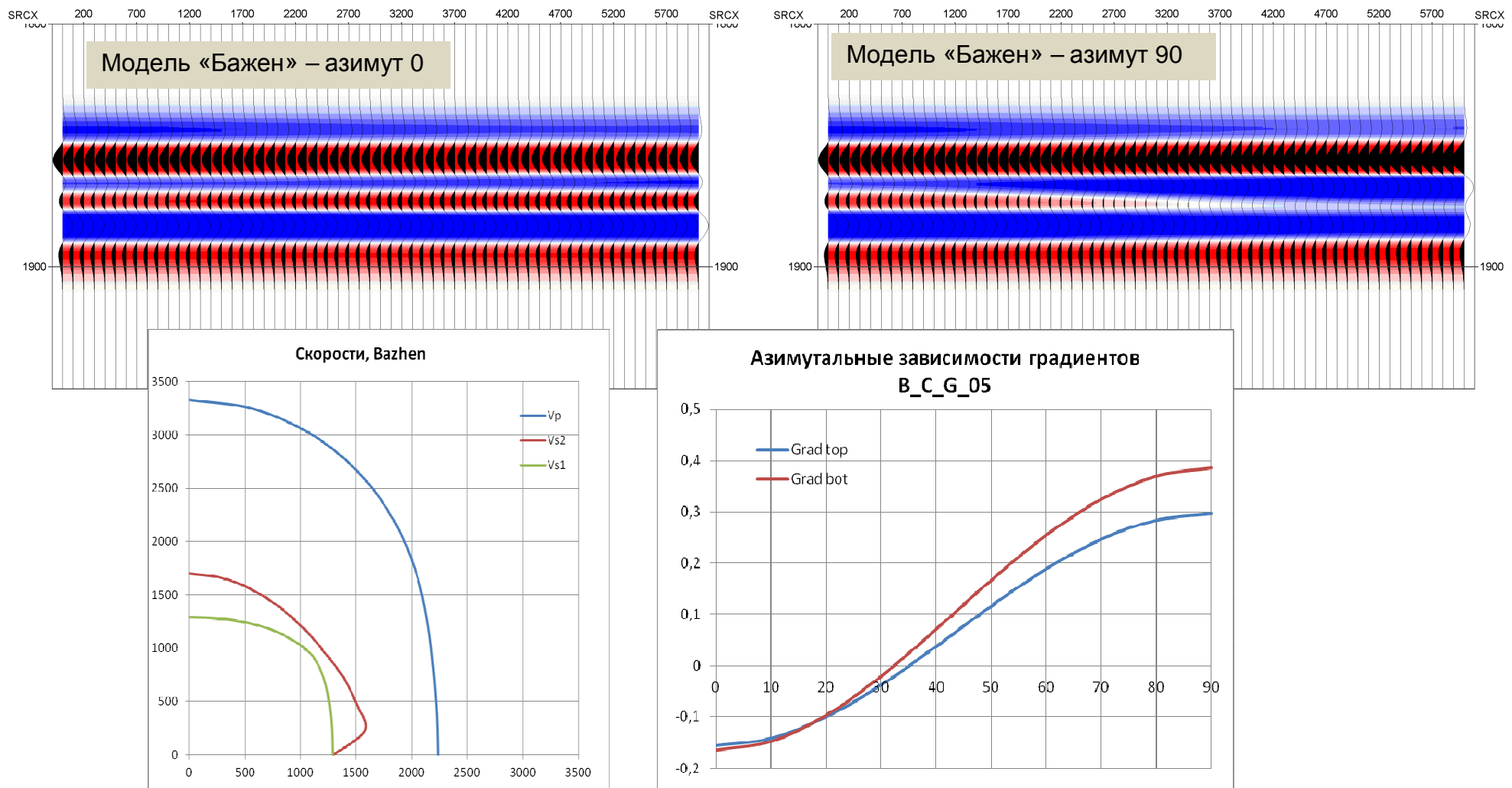
Сравнение эффективных моделей трещиноватого карбонатного коллектора: ВЫВОДЫ



- наибольшей чувствительностью к трещиноватости обладают **изменения амплитуд с удалением**, особенно на больших расстояниях
- наиболее яркие отличия между градиентами для трещиноватых и нетрещиноватых (изотропных) пород проявляются **вблизи верхней и нижней границ интервала**
- 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
- отмечается азимутальное изменение критических углов на кровле пласта
- для карбонатной толщи картирование величин градиентов амплитуд и их азимутальной изменчивости в сопоставлении с эталонными данными математического сейсмо моделирования является способом диагностики наличия и типа вертикальной трещиноватости

Сравнение эффективных моделей: Бажен

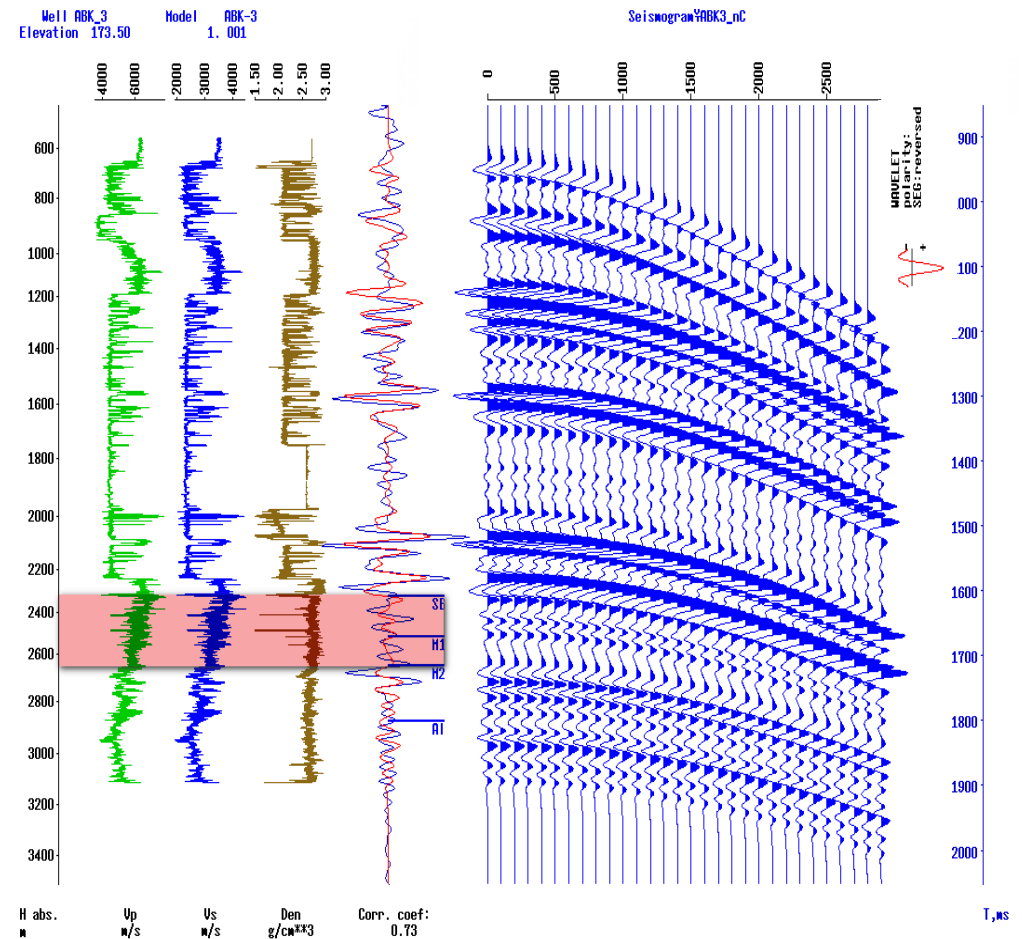
- исходя из работ Усманова (2006), Ревенко (2013), Гогоненкова и др. (2012) были построены модели трещиноватых коллекторов Баженовской свиты
- смоделированы эффекты азимутальных изменений амплитуд
- влияние тонких трещиноватых слоев отмечено во всем интервале Баженовской свиты



Анализ диагностических возможностей оценки трещиноватости в системе ИНПРЕС



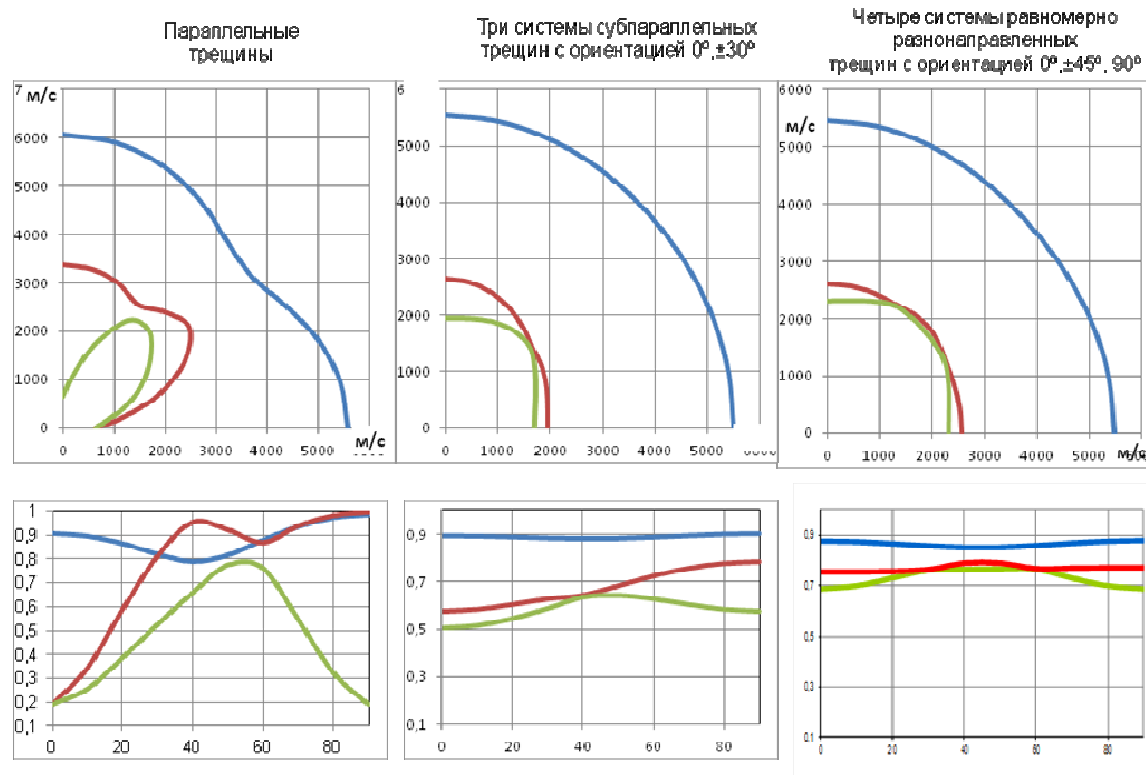
- пример анализа карбонатного коллектора по реальной сейсмике
- упругие свойства слоев соответствовали данным ГИС имеющихся на площади скважин
- в карбонатном интервале продуктивной толщи задавались три типа систем открытых вертикальных трещин:
 - **регулярные трещины** - система однонаправленных трещин
 - **трещины с доминирующей ориентацией** – несколько систем субпараллельных трещин при наличии преобладающей направленности
 - **разнонаправленные трещины** - несколько систем трещин без какой-либо преобладающей ориентации
- для определения свойств эффективной модели использовался подход, основанный на **модели Эшелби** эллипсоидального включения.
- упругие свойства флюида во включении (трещине) соответствовали свойствам воды, упругие свойства окружающей включение сплошной среды соответствовали данным каротажа карбонатного интервала.



Акустическая модель с трещиноватым коарбонатным коллектором и синтетическая сейсмограмма ОСТ.

Анализ диагностических возможностей оценки трещиноватости в системе ИНПРЕС

- влияние трещиноватости на величину фазовых скоростей распространения волн при плотности трещин 0.5% и аспектном отношении 1:1000.

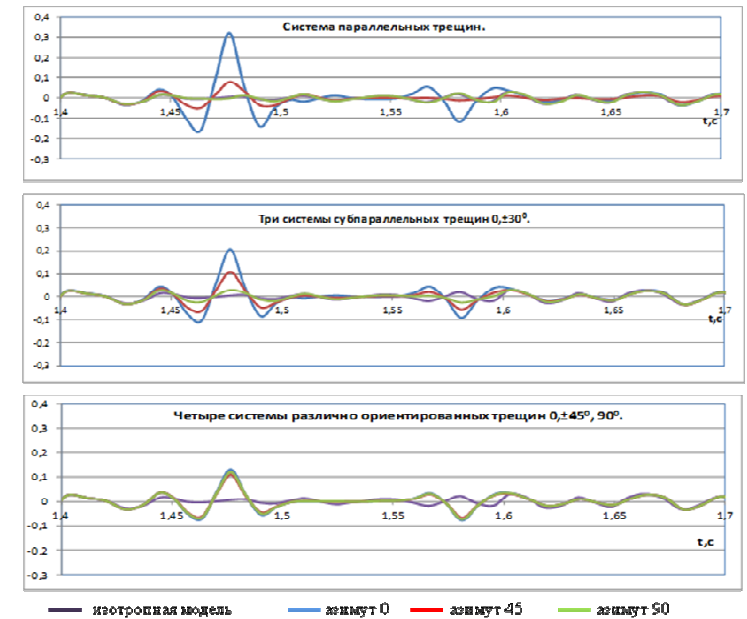
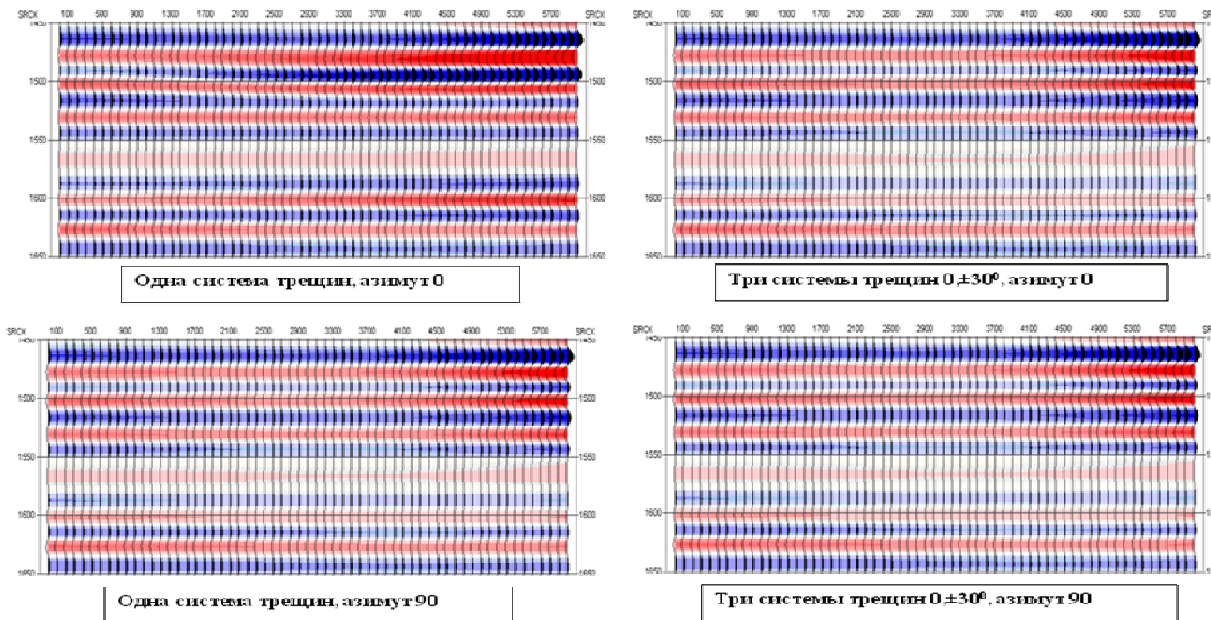


Индикатрисы фазовых скоростей и относительные азимутальные изменения скоростей в трещиноватом коллекторе.

- в отсутствии трещин скорости в сплошной породе составляют $V_p = 6152 \text{ м/с}$ и $V_s = 3375 \text{ м/с}$.
- появление трещин приводит к **заметному снижению скоростей**, а при однонаправленных трещинах и доминирующей ориентации трещин – еще и к **заметной азимутальной анизотропии скоростей**

Анализ диагностических возможностей оценки трещиноватости в системе ИНПРЕС

- 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



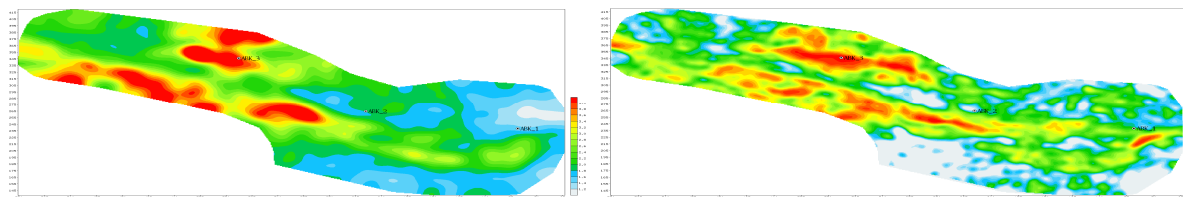
Синтетические сейсмограммы ОСТ для различных моделей трещиноватого коллектора. Слева – для однонаправленных трещин, справа для системы трещин с доминирующим направлением.

Влияние анизотропии трещиноватого коллектора на азимутальные зависимости градиентов амплитуд для различных моделей среды.

- наиболее ярко отличия между градиентами для трещиноватых и нетрещиноватых (изотропных) пород проявляются вблизи верхней ($t=1.46c$) и нижней ($t=1.60c$) границ интервала, где трещиноватые карбонаты контактируют с нетрещиноватыми вмещающими отложениями. Внутри толщи карбонатов появление трещиноватости мало влияет на градиенты

Анализ диагностических возможностей оценки трещиноватости в системе ИНПРЕС

- **диагностические возможности анализа скоростей и импедансов**
- для выявления и оценки вертикальной трещиноватости по отраженным волнам целесообразно учитывать **признаки снижения скорости распространения сейсмических колебаний и импедансов**, а также изменения отношения продольных и поперечных скоростей по сравнению со значениями, измеренными при каротаже
- **изменения вертикальных спектров скоростей** могут использоваться как устойчивые признаки трещиноватости только для мощных (порядка нескольких длин волны) трещиноватых пластов
- для изучения трещиноватости по абсолютным значениям продольных скоростей и/или импедансов, найденных по сейсмическим данным, требуется, 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
- скорости и импедансы весьма чувствительны к изменениям литологии 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**

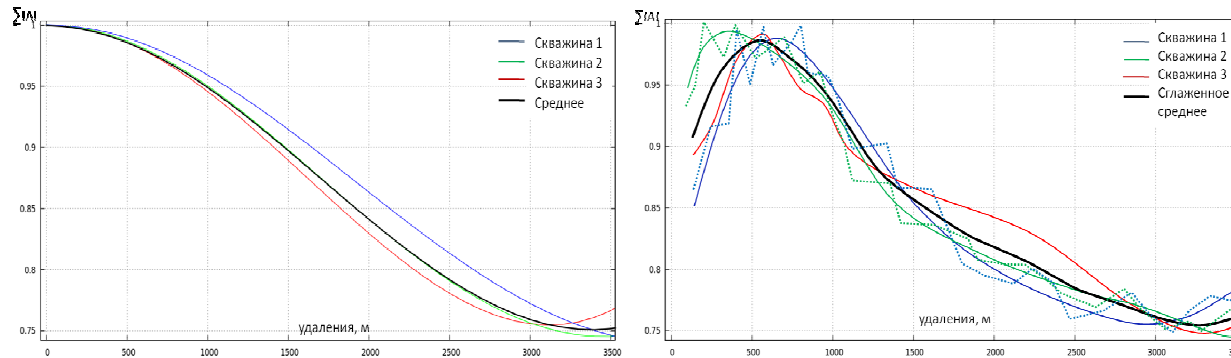


отношение сигнал/помеха

регулярность колебаний

Анализ диагностических возможностей оценки трещиноватости в системе ИНПРЕС

- для карбонатной толщи картирование величин градиентов амплитуд и их азимутальной изменчивости в сопоставлении с эталонными данными является способом диагностики наличия и типа вертикальной трещиноватости.
- для анализа трещиноватости по градиентам амплитуд малое соотношение сигнал/помеха не является принципиальным ограничением. Изменение амплитуд с удалением на синтетических и реальных сейсмограммах, полученных у скважин, неплохо соответствует друг другу, начиная с расстояний 500-700 м.

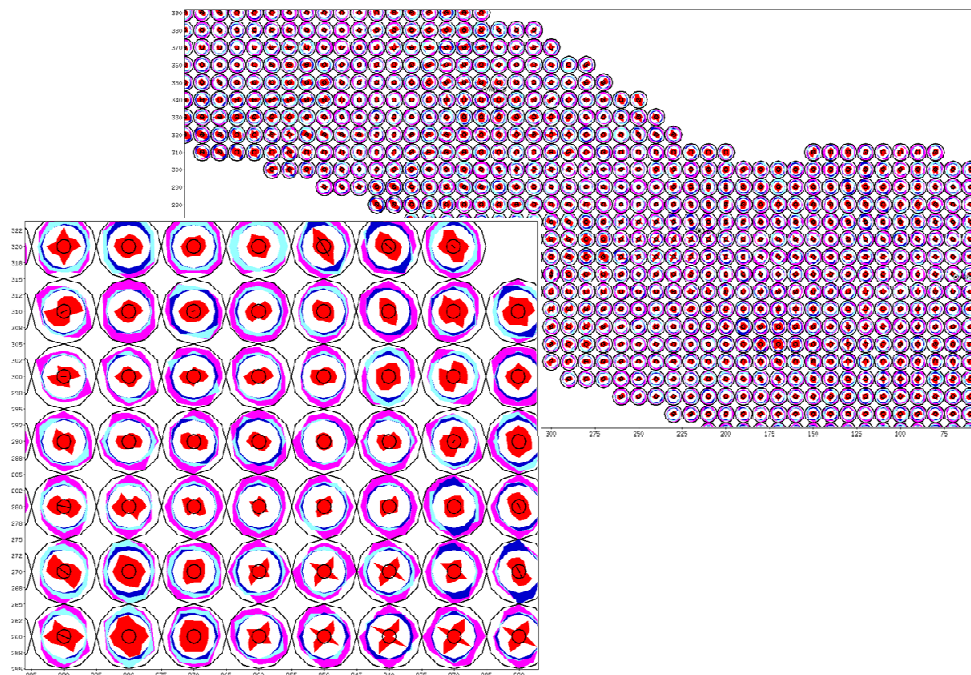


Изменение модулей амплитуд отраженных волн с удалением для модельных (слева) и реальных (справа) сейсмограмм.

- 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, составляющим десятки процентов. Следовательно, анализ градиентов амплитуд в условиях анализируемой площади в принципе пригоден для изучения трещиноватости.

Анализ диагностических возможностей оценки трещиноватости в системе ИНПРЕС

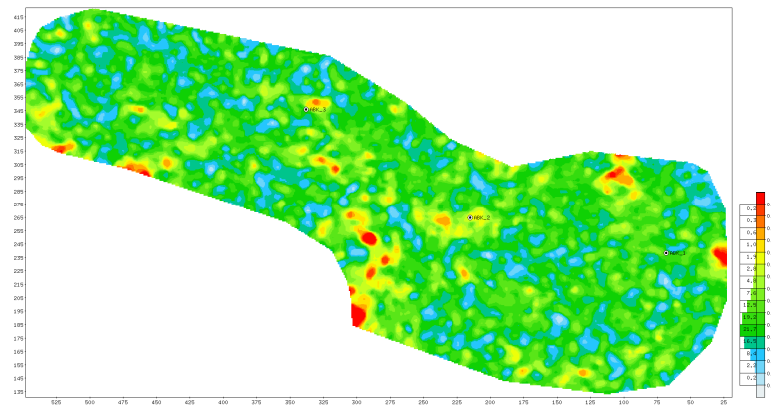
- по осредненным данным рассчитаны азимутальные градиенты амплитуд через каждые 30° и построены азимутальные диаграммы амплитуд и градиентов. По периферии диаграмм показано изменение амплитуд в зависимости от угла и направления. Радиус в каждом азимуте пропорционален величине амплитуды, а цвет соответствует 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.



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.

Анализ диагностических возможностей оценки трещиноватости в системе ИНПРЕС

- 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 отсутствии амплитудных искажений были бы идентичны по всем азимутам, т.к. соответствуют независящему от азимута коэффициенту отражения при вертикальном падении волны на границы. Фактически вариации R_0 составляют в среднем 20%

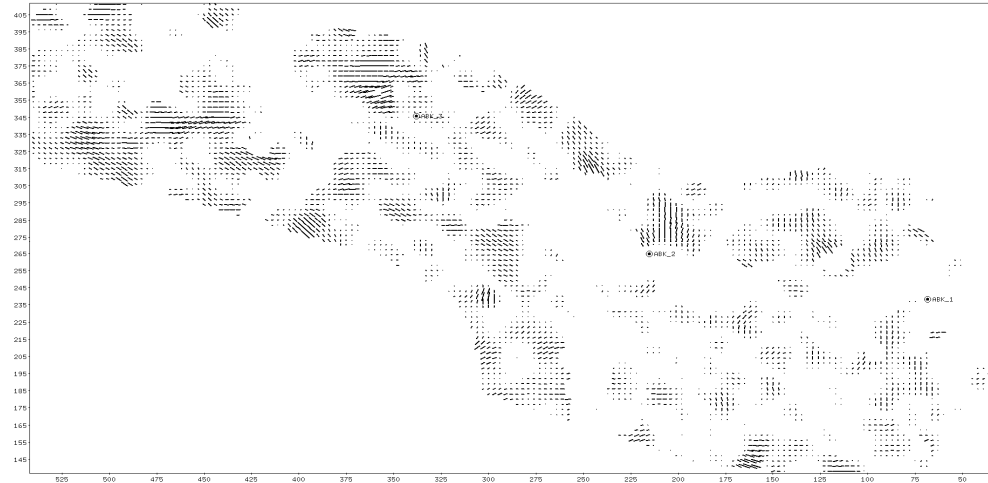


Относительные азимутальные вариации
коэффициента R_0 .

- после фильтрации и осреднения соотношение сигнал-помеха в каждом из азимутальных направлений хотя и сохранилось на том же уровне, что и для трасс суммарного куба, но оказалось **недостаточным для высокоточного AVO анализа**

Анализ диагностических возможностей оценки трещиноватости в системе ИНПРЕС

- карты трещиноватости, рассчитанные по градиентам амплитуд

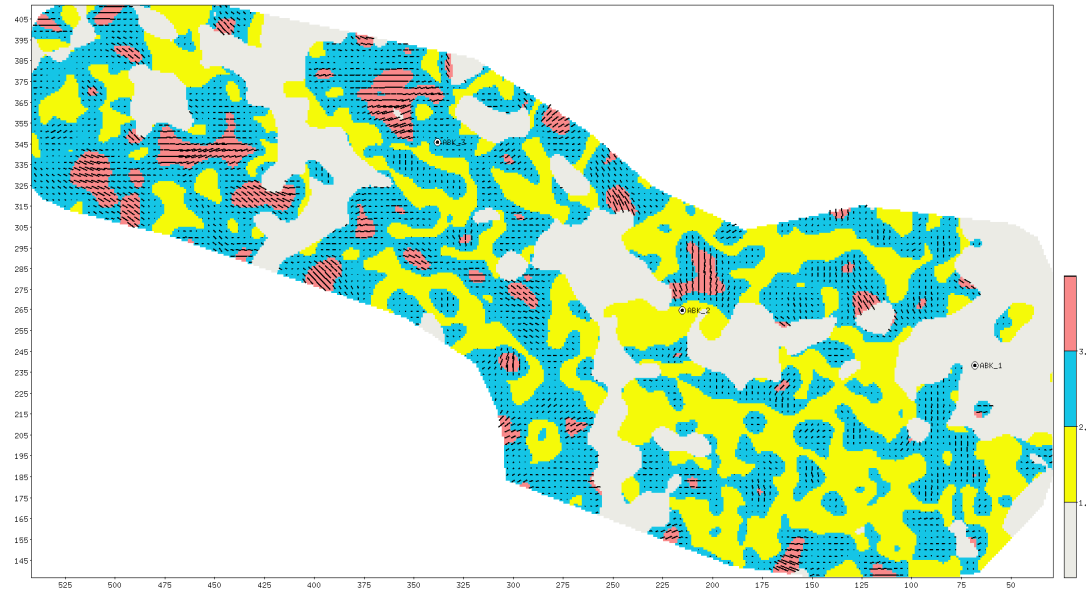


Прогноз вертикальной трещиноватости карбонатной толщи венда, в предположении параллельности трещин. Длина штрихов пропорциональна коэффициенту

- 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
- при стандартном подходе к интерпретации, карбонаты почти по всей площади необходимо считать трещиноватыми, при этом трещины преимущественно ориентированы в широтном, меридиональном и северо-западном направлениях.
- к нетрещиноватым породам отнесены участки, в пределах которых эксцентриситеты отличаются от 1 не свыше чем на 20%, т.е. не превышают 1,2. Их суммарная площадь составляет примерно 50% от всей исследованной

Анализ диагностических возможностей оценки трещиноватости в системе ИНПРЕС

- карты трещиноватости, рассчитанные по градиентам амплитуд



*Прогноз вертикальной трещиноватости карбонатной толщи венда, 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.*

- карта рассчитана с более детальным анализом эксцентриситетов, при котором учитываются результаты сейсмомоделирования для карбонатов продуктивной толщи
- выявлены и показаны на карте участки развития разнонаправленных трещин, в совокупности не обладающих доминирующей ориентацией
- зона развития ориентированных трещин, исходя из значений эксцентриситетов, дополнительно разделена на две подзоны – однонаправленных трещин и совокупности трещин со сходной ориентацией

Основные выводы

- **методика прогноза трещиноватости**, используемая в комплексе *ИНПРЕС-ПРОГНОЗ* основана на сочетании традиционных способов анализа скоростей и градиентов амплитуд продольных отраженных волн, с математическим моделированием обусловленных трещинами сейсмических эффектов, возможных на участке проведения работ
- **доказана** принципиальная возможность применения данной методики для прогноза и оценки трещиноватости
- предлагается 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
- **обосновывается алгоритмическая база** программного обеспечения *INPRES* для выявления и оценки параметров трещиноватых зон (коллекторов) по азимутальным вариациям сейсмических характеристик однократно отраженных и обменных волн
- **демонстрируются примеры** использования программы
- рекомендуется расширить диапазон методов теоретического учета влияния трещиноватости на упругие свойства пород и особенности сейсмического волнового поля за счет применения иных моделей строения трещиноватых пород
- рекомендуется разработать технологию обработки полевых материалов, сохраняющую динамические особенности не только однократно отраженных, но и рассеянных волн от целевого интервала разреза и способов расчета волновых полей

Благодарю за внимание