



**Н.Б. Красильникова**  
ООО РН-Красноярск-  
НИПИнефть, директор  
департамента геологии  
KrasilnikovaNB@kr-nipineft.ru



**А.А. Осипенко**  
ООО РН-Красноярск-  
НИПИнефть  
ведущий геофизик  
Osipenko\_AA@kr-nipineft.ru



**Р.К. Разяпов**  
канд. геол.-мин. наук  
ОАО Востсибнефтегаз  
главный геолог  
RazyapovRK@vsnk.ru



**А.С. Сорокин**  
ОАО Востсибнефтегаз  
начальник отдела  
геологии и разработки  
месторождений  
SorokinAS@vsnk.ru



**Р.А. Шишкин**  
ООО РН-Красноярск-  
НИПИнефть, главный  
специалист, зам. зав.  
комплексным отделом  
петрофизики и интер-  
претации данных ГИС  
ShishkinRA@kr-nipineft.ru

# Определение параметров трещиноватости рифейских коллекторов с использованием данных широкополосного акустического каротажа

*В работе приводятся результаты исследования возможностей широкополосного акустического каротажа при изучении трещиноватости рифейских коллекторов на примере Юрубчено-Тохомского месторождения. Предложена методика оценки интегральной раскрытости трещин как функции от амплитуды затухания акустических волн*

*The paper presents results of research capabilities of full-wave acoustic logging in the study of fractured reservoirs in the example of the Riphean – Yurubcheno-Tokhomskoye field. The author proposes a method of estimating the integral fracture opening as a function of the amplitude attenuation of acoustic waves*

**Ключевые слова:** широкополосный акустический каротаж, трещиноватость, рифей, раскрытость трещин, проницаемость  
**Keywords:** full-wave acoustic logging, fracturing, Riphean, fracture opening, permeability

**П**роблема изучения коллекторских свойств трещиноватых карбонатных пород известна исследователям давно. В иностранных источниках влияние трещин на нефтеотдачу отмечено еще в 40–50-х гг. прошлого века в связи с открытием месторождений в плотных трещиноватых карбонатных породах (крупнейшее месторождение в Иране, связанное с карбонатной формацией Асмари, месторождения в Западном Техасе, приуроченные к уникальной формации Спрейберри и др.).

В СССР наиболее ранние сведения о влиянии трещин на нефтедобычу получены при разведке и разработке Карлинского (1941) и Кинзепулатовского (1943) месторождений в Башкирии. В обоих случаях нефтеносными оказались плотные известняки сакмаро-артинского возраста нижней перми, из которых промышленные притоки получались лишь в случаях их сильной разработанности вертикальными трещинами (Белоновская Л.Г., 2006).

Десятилетие спустя (1953–1954) грандиозными фонтанами были открыты месторождения нефти сначала в Дагестане (Сели, Гаша), затем в Чечено-Ингушетии (Карабулак). Насыщенной оказалась толща (300–500 м) светлых, слоистых, мелкозернистых, плотных, сильно трещиноватых известняков верхнего мела, до этого считавшихся бесперспективными для поиска (Белоновская Л.Г., 2006).

С открытием новых месторождений в трещинных карбонатных породах с изменчивыми или низкими коллекторскими свойствами, которые не поддавались традиционному изучению, перед исследователями встал вопрос достоверного прогноза и оценки вмещающих характеристик трещиноватых коллекторов.

По результатам многочисленных работ под руководством Е.М. Смехова была предложена модель трещинного коллектора, базирующаяся на учении о трещинах и их преимущественном развитии на глубине, в соответствии с которой трещинный коллектор представляет собой горную породу, рассеченную системами трещин на многочисленные блоки. Проницаемость такого коллектора обусловлена, в основном, межблоковым пространством (микротрещины и, возможно, редкие макротрещины), а емкость – пустотами первичного и вторичного происхождения (Смехов Е.М., 1974). Открытые трещины принимают участие в фильтрации углеводородов, обеспечивая гидродинамическую связь с блоками пористой матрицы (блоками породы, разделенными макротрещинами).

В зависимости от размеров можно выделить микро- и макротрещины. Изучение

микротрещиноватости на керне проводится в лабораторных условиях, используются различные методы оценки – ядерно-магнитная томография, насыщение люминофором, капиллярметрические методы и др. Микротрещиноватость является характеристикой массива породы. Изучение трещиноватости на макроуровне должно учитывать не только генезис трещин, условия формирования которых обусловлены тектоническими процессами, контролируемыми образованием месторождения, но и их ориентацию в пространстве.

Трещины могут оказывать либо положительное, либо отрицательное влияние на движение флюидов по породе в зависимости от того, открыты они или же залечены выпавшими в осадок минералами. Однако в большинстве исследований в области моделирования трещин считается, что трещины открыты и положительно влияют на движение флюидов (Тиаб Дж., Дональдсон Эрл Ч., 2009).

Согласно классификации Р.А. Нельсона (1987), выделяется 4 типа коллекторов с естественной трещиноватостью.

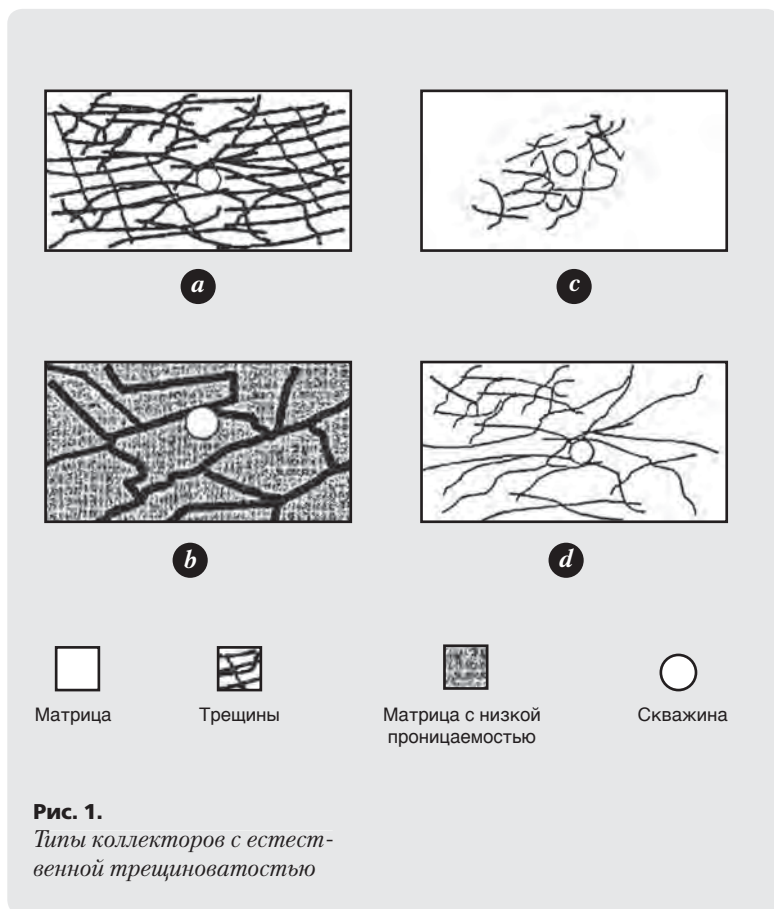
**Тип 1.** Трещины обеспечивают все наблюдаемые фильтрационно-емкостные свойства. Широко известна приуроченность залежей углеводородов к коллекторам первого типа на месторождениях Амаль в Ливии, Ла-Пас и Мара в Венесуэле, а также на месторождениях, открытых в докембрийском фундаменте в восточном Китае (*рис. 1а*).

**Тип 2.** Матрица имеет пренебрежимо малую проницаемость, но содержит основную часть углеводородов (если не все). Проницаемость коллектора обеспечивается в основном его трещиноватостью, как, например, на месторождениях Монтерей в Калифорнии и Спрейберри в Западном Техасе (*рис. 1б*).

**Тип 3.** Матрица имеет хорошую проницаемость. Трещины увеличивают проницаемость коллекторов, которые в результате могут давать весьма высокие дебиты, как, например, на месторождениях Киркук в Ираке и Асмари в Иране (*рис. 1с*).

**Тип 4.** Трещины заполнены вторичными минералами. Зоны развития коллекторов этого типа образуют барьеры для мигрирующих флюидов и разбивают залежи на относительно мелкие части (*рис. 1д*). Такие залежи крайне неоднородны, их разработка и эксплуатация часто бывают нерентабельны (Тиаб Дж., Дональдсон Эрл Ч., 2009).

Трещинные коллекторы Юрубчено-Тохомского месторождения во многом уникальны, в полной мере не принадлежат ни к одному из вышеперечисленных типов, а образуют



**Рис. 1.**  
Типы коллекторов с естественной трещиноватостью

интеграцию 1 и 3 типов со значительной долей участия кавернозности в емкостном пространстве коллектора.

Распределение трещин в массиве горных пород связано с фазами образования пликативных и дизъюнктивных нарушений. Трещины, относящиеся к складкам, обычно имеют хаотичное пространственное распространение, но при этом показывают четкую ориентацию по одному или нескольким явно выраженным направлениям.

Трещины, связанные с дизъюнктивными нарушениями, группируются рядом с крупными тектоническими разломами и оперяют их, образуя так называемые коридоры трещин. Они распределены в виде нескольких групп и остаются параллельными в пределах интервала повышенной концентрации трещин.

Трещины могут, например, концентрироваться в определенных литологических слоях или слоях с отличительными механическими свойствами. Кроме того, они могут иметь техногенный характер и отображаться в зависимости от изменения траектории скважины или, что более часто, связаны с качеством представления и интерпретации скважинных микросканиров (при отсутствии данных керн).

Коридоры трещин имеют большую протяженность и иногда достигают несколько сотен метров. Генетически они могут принадлежать или не принадлежать разлому и приразломным нарушениям, но характеризоваться схожими геометрическими параметрами (например большим вертикальным и горизонтальным распространением). В общем случае такие трещины пересекают все пространство резервуара и проходят через различные его части, соединяя или разъединяя их.

В настоящее время месторождения нефти и газа в карбонатных коллекторах известны в США, Канаде, Мексике, Саудовской Аравии, Кувейте, Иране, Омане, Сирии, Китае и других странах.

В России наиболее широко карбонатные породы и карбонатные коллекторы нефти и газа представлены в Волго-Уральской области и Тимано-Печорской провинции, Оренбургско-Актюбинском Приуралье, Прикаспийской впадине, в Ставропольском крае и Дагестане, на Северо-Западном Кавказе, на Сибирской платформе и в других регионах.

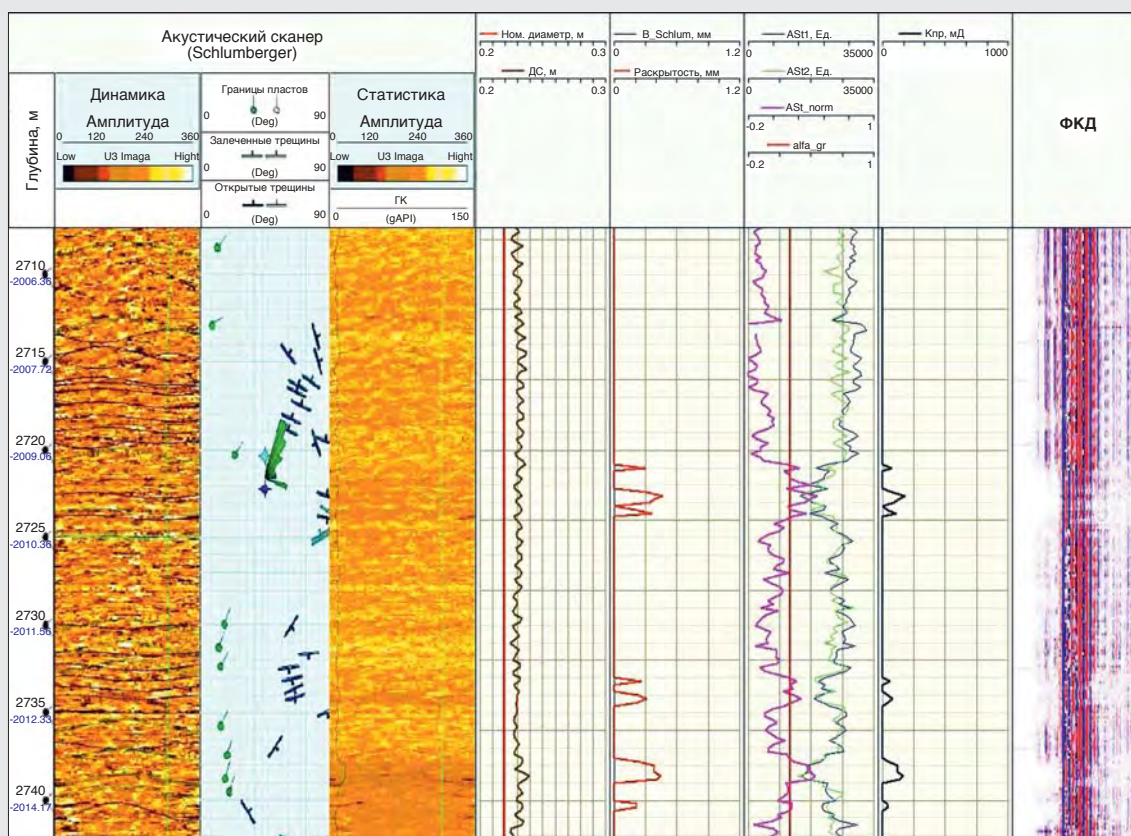
Изучение сложноостроенных карбонатных коллекторов требует применения высокотехнологичных и эффективных методов, позволяющих извлекать наиболее полную информацию о строении и свойствах трещинных коллекторов.

В достаточно однородном разрезе, представляющем мощную толщу доломитов с редкими прослойками аргиллитов и интервалов окремнения, каким, по сути, являются рифейские отложения Юрубчено-Тохомского месторождения, наиболее достоверное выделение зон трещиноватости возможно лишь с применением акустического каротажа (по преломленным и отраженным волнам), с привлечением к совместной интерпретации других геофизических методов исследования скважин (ГК, НГК, ГГК-п, кавернометрии и др.).

Столь существенная роль акустических методов в выделении трещиноватости связана с отражением, преломлением и рассеиванием упругих волн на естественных поверхностях – трещинах, в то время как для радиоактивных методов (ГК, НГК, ГГК-п и др.), такие поверхности является «прозрачными».

Значительный вклад в разработку теории, аппаратуры и интерпретации данных акустических методов исследования скважин внесли И.П. Дзевань, Е.В. Карус, О.Л. Кузнецов, Б.Н. Ивакин, Г.В. Дахнов, П.А. Прямов и др.

Анализируя накопленный опыт изучения трещиноватых коллекторов, исследователи часто высказывают весьма противоречивые мнения



**Рис. 2.**  
Определение раскрытости и проницаемости трещин по данным АКШ (Schlumberger) (скв. XX1, интервал 2707–2743 м)

о целесообразности применения тех или иных методик интерпретации данных акустического каротажа. Одни отдают предпочтение поверхностной волне Стоунли, другие более быстрым волнам – продольной и поперечной. Однако общими критериями выделения трещиноватых интервалов по данным акустического каротажа являются следующие [1]:

- искажение фазовых линий (особенно в области поперечных волн) на ФКД;
- уменьшение амплитуд (соответственно, увеличение коэффициента затухания) продольных, поперечных волн и волн Стоунли;
- повышение значения интервального времени продольных волн в участках разреза, где развиты трещины, перпендикулярные оси скважины;
- превышение значений коэффициента пористости, рассчитанных по данным акустического каротажа ( $K_{II}^{AK}$ ), над его значениями, рассчитанными по данным гамма-гамма плотностного каротажа ( $K_{II}^{ГК-П}$ ).

Следует отметить, что аналогичная картина может наблюдаться в глинистых породах и против интервалов переслаивания пластов с резкими отражающими границами. Поэтому при выделении зон трещиноватости

привлечение других методов геофизического исследования скважин необходимо для исключения мешающих факторов.

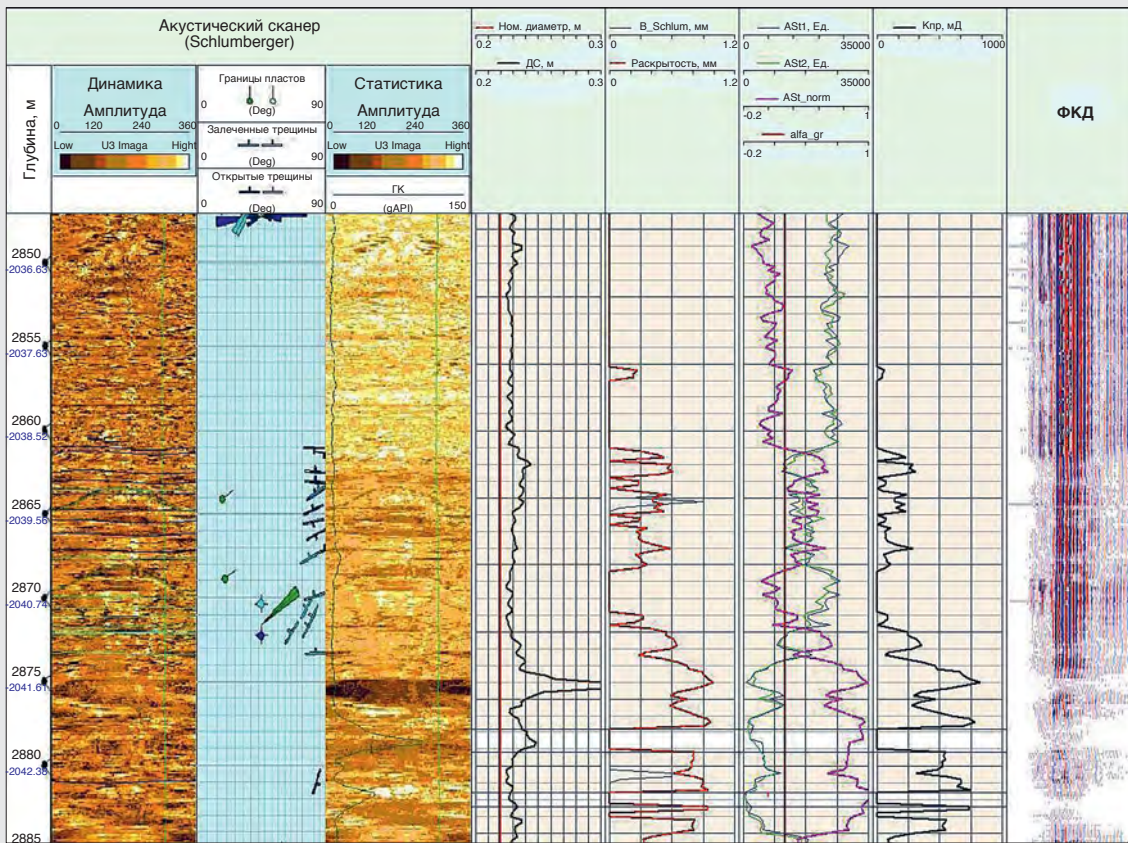
Физической основой выделения зон повышенной трещиноватости по величине динамических параметров поперечных ( $A_S; \alpha_S$ ) волн и волн Стоунли ( $A_{ST}; \alpha_{ST}$ ) является повышенная чувствительность параметров этих волн к увеличению фильтрационной способности горных пород.

В этой связи наиболее перспективно изучение поведения поперечной волны, поскольку другие волны менее чувствительны к наличию трещиноватости, выделенной по данным акустического микро-сканера и керна. Определена эмпирическая зависимость интегральной раскрытости трещин  $b$  (мм) от нормированной амплитуды продольной волны  $A_S^{норм}$

$$b = k \cdot (A_S^{норм} - A_S^{гран}) \quad (1)$$

где  $k$  – коэффициент пропорциональности ( $k = 0,75$ ).

$$A_S^{норм} = \frac{(A_{S\_макс} - A_S)}{(A_{S\_макс} - A_{S\_мин})} \quad (2)$$



**Рис. 3.** Определение раскрытости и проницаемости трещин по данным АКШ (Schlumberger) (скв. XX1, интервал 2848–2885 м)

где  $A_s$  – амплитуда продольной волны, определенная по данным полной волновой картины (ФКД),

$A_{s\_макс}$  – максимальное значение амплитуды;  
 $A_{s\_мин}$  – минимальное значение амплитуды;  
 $A_{s\_гран}$  – граничное значение нормированной продольной волны ( $A_{s\_гран} = 0,2$ ).

Введение граничного значения нормированной продольной волны ( $A_{s\_гран}$ ) необходимо для устранения помех, связанных с зашумленностью сигнала, а также с поглощениями акустических волн за счет литологической неоднородности (рис. 2, 3). Коэффициент пропорциональности ( $k$ ) используется для связи размерностей нормированной амплитуды волны  $A_{s\_норм}$  (д.ед.) и раскрытости трещины  $b$  (мм).

При сопоставлении трещиноватости по данным широкополосной акустики (АКШ) и акустического микро-сканера необходимо учитывать, что глубинность исследования АКШ выше, чем у скважинного акустического телевизора (САТ). Вследствие этого трещины, усиленные бурением, трассы которых на стенках скважины могут отображаться как открытые, по данным более глубинного метода АКШ будут определяться как залеченные.

Вертикальная разрешающая способность широкополосной акустики составляет около 50 см, в связи с чем АКШ не может различить отдельные трещины со слабой раскрытостью и характеризует, как правило, суммарную раскрытость группы трещин.

Связь коэффициента проницаемости ( $K_{пр}$ ) с раскрытостью трещин ( $b$ ) для Юрубчено-Тохомского месторождения в настоящий момент не может быть найдена, поскольку требует накопленного статистического материала по испытанию скважин. Однако качественно и полуколичественно может быть охарактеризована уравнением проницаемости для единичной трещины, описанной Т.Д. Голф-Рахтом [2]:

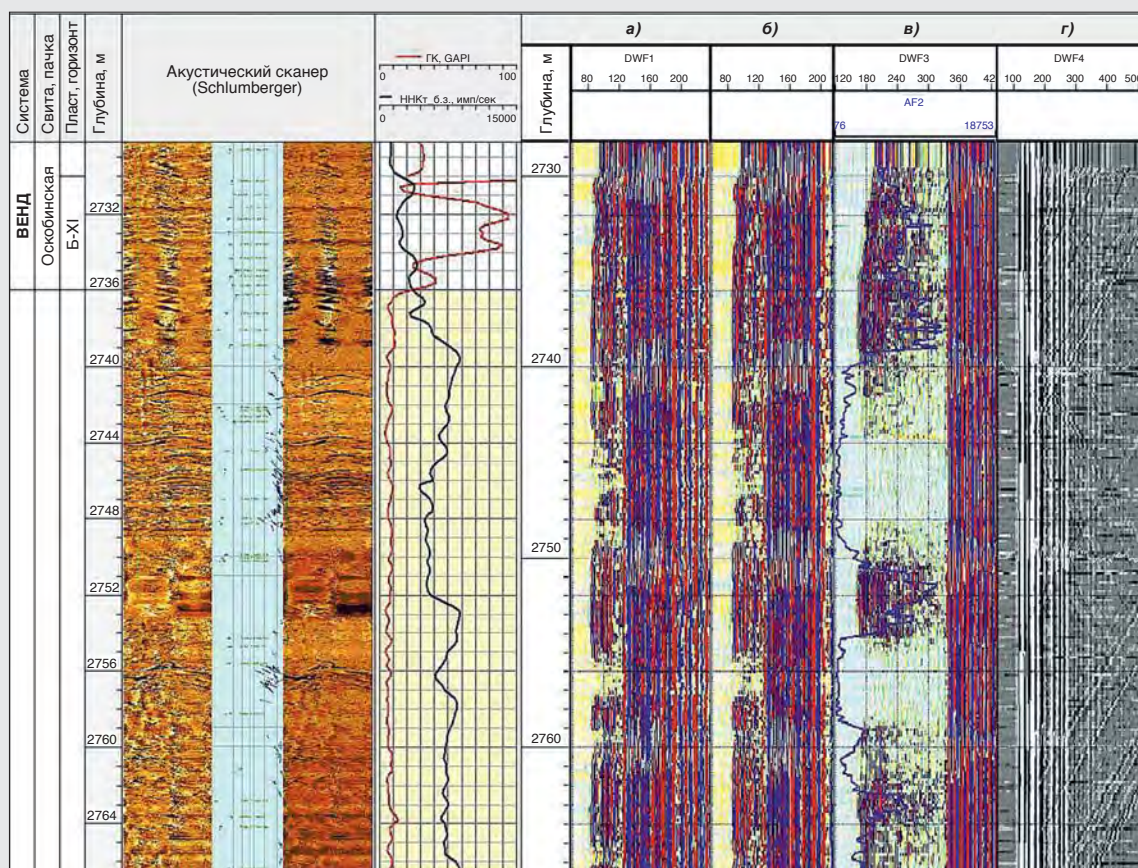
$$K_{пр} = 8,33 \cdot 10^{-4} \cdot b^2 \cdot K_{н.тр} \quad (3)$$

где  $K_{н.тр}$  – коэффициент трещинной пористости, д.ед.,

$b$  – раскрытость трещин, мкм,

$K_{пр}$  – коэффициент проницаемости, мкм<sup>2</sup>.

Поскольку для качественной регистрации акустического сигнала необходимо наличие нескольких источников разной частоты и приемников, расположенных на различных расстояниях от источников, большое влияние



**Рис. 4.** Фазокорре-  
ляционные  
диаграммы  
от различных  
приемников:  
а – близкий  
среднечастот-  
ный; б – близ-  
кий низко-  
частотный;  
в – дальний  
среднечастот-  
ный; г – дальний  
низкочастот-  
ный. (АКШ  
(Schlumberger);  
сква. XX2,  
интервал  
2728–2767 м)

на полученные результаты оказывает тип применяемой аппаратуры АКШ.

В рассматриваемых скважинах исследования проводились высокотехнологичным прибором АКШ компании *Schlumberger*, имеющим большое количество приемников и излучателей. Интерпретация полученных данных показала, что наиболее сильные поглощения акустических волн наблюдаются только на удаленных приемниках со средней частотой излучения (рис. 4в), в то время как близкорасположенные приемники не показывают сильного затухания волн в интервалах трещин (рис. 4а, б).

Таким образом, близкорасположенные приемники эффективны при оценке интервальных

времен акустических волн, но не эффективны при выделении трещин.

Интересные показания получаются при регистрации волн от низкочастотного излучателя на удаленных приемниках. На волновой картине прослеживаются шеврообразные следы, также подтверждающие наличие трещин (рис. 4г).

Очевидна важность применения широкополосного акустического каротажа при изучении трещиноватых коллекторов Юрубчено-Тохомского месторождения. Необходимо отметить и не меньшую важность правильного подбора частотно-геометрических характеристик зондов АКШ для эффективного выделения трещин. ■

#### Литература

1. Золоева Г.М. Акустические методы исследования скважин. Учебное пособие, М., РГУ-НГ им. акад. И.М.Губкина, 2004.
2. Голф-Рахт Т.Д. Основы нефтепромысловой геологии и разработки трещиноватых коллекторов / Под ред. А.Г. Ковалева. – М.: Недра, 1986.
3. Методические рекомендации по интерпретации материалов широкополосного акустического каротажа (АКН-1). М., Всесоюзный научно-исследовательский институт ядерной геофизики и геохимии, 1980.