



## ПРИНЦИПИАЛЬНО НОВЫЕ ВОЗМОЖНОСТИ МНОГОВОЛНОВОЙ СЕЙСМОРАЗВЕДКИ

В. З. Кокшаров

На основе комплексного анализа данных многоволновой сейсморазведки (МВС), скважинных измерений, петрофизики, физического и математического моделирования, теоретических работ удалось сформулировать и обосновать методологию выявления зон вертикальной трещиноватости в пластах карбонатных пород. Установлено, что по значению коэффициента Пуассона, определяемого по интервальным временам продольных и поперечных обменных волн данных 2D-3С сейсморазведки, можно определять параметры трещиноватости и свойства порозаполнителей. Открывается возможность с использованием волн разных типов и их поляризации определять анизотропные характеристики пород не на качественном, а на количественном уровне. Рассматривается также способ вычисления значения коэффициента Пуассона в рифейской части разреза, не вскрытого бурением. Подход основан на переходе от интервальных времен к производным по координате  $x$  (изменение расстояния по профилю).

**Ключевые слова:** многоволновая сейсморазведка, коэффициент Пуассона, вертикальная трещиноватость, рифей, венд, усольская свита.

## ESSENTIALLY NEW OPPORTUNITIES OF MULTIWAVE SEISMIC EXPLORATION

V. Z. Koksharov

Based on the complex analysis of multiwave seismic exploration (MWSE) data, in-situ measurements, petrophysics, physical, mathematical modeling and theoretical works it has been possible to formulate and prove the technique for vertical jointing delineating zones of in carbonate rock beds. It is established that it is possible to determine jointing parameters and pore filler properties by Poisson's ratio determined by interval times of longitudinal and transverse converted waves of 2D-3C seismic exploration data. The use of different types waves of and their polarization opens up possibilities to define anisotropic characteristics of rocks not at a qualitative but at a quantitative level. A way to calculate Poisson's ratio values in the Riphean part of the section, which hasn't been drilled in, is also considered. The approach is based on transition from interval times to  $T_{PP}$ ,  $T_{PS}$  time derivatives along  $x$ -coordinate (lateral ranging).

**Keywords:** multiwave seismic exploration, Poisson's ratio, vertical jointing, Riphean, Vendian, Usolskaya Formation.

Когда речь заходит об использовании многоволновой сейсморазведки (МВС), очень часто можно услышать мнение о фактической бесполезности данного метода. Считается, что с помощью МВС в основном решают экзотические задачи и практически все потенциальные ее преимущества перекрываются недостатками. Для извлечения из данных МВС полезной информации необходимы крайне высокий уровень технологий и, главное, высокая квалификация персонала. Причем последнее оказывается часто наиболее труднодостижимой задачей [3]. Однако если работы по технологиям МВС в Канаде и США уже становятся стандартными, в России они по-прежнему носят эпизодический характер.

Все это относится и к использованию МВС в Восточной Сибири. Ситуация усугубляется также тем, что высокоскоростной разрез, представленный преимущественно карбонатными породами, фактически не позволяет использовать основное преимущество метода – выделять по коэффициенту Пуассона ( $\sigma$ ) нефтегазонасыщенные и водонасыщенные зоны.

Развитие технологии МВС в России практически остановилось, но это можно отнести и к сейсморазведке в целом. Оценим, например, точность наших измерений. Рассмотрим типичный результат

проведения ВСП в скважине. Данные ВСП не позволяют достоверно построить пластовую модель с мощностью слоев менее 100 м (рис. 1). В самом деле, если шаг дискретизации в ВСП 1 мс, то при скорости 6000 м/с, уже за счет шага дискретизации, погрешность по глубине составляет 6 м. Поскольку для корректных вычислений скорости требуется временной интервал по крайней мере в 10 раз больший, то в глубинном масштабе это будет уже 60 м. Возникает вопрос, как можно требовать от сейсморазведки картирования отдельных горизонтов  $B_v$ ,  $M$ ,  $M_1$ ,  $M_2$ ,  $R_0$ , если разница между ними в глубинном масштабе составляет 45, 65, 55, 30 и 60 м. Иными словами, точность измерений явно недостаточна.

Какие же результаты достигнуты в плане повышение информативности и достоверности результатов геологической интерпретации имеющихся данных МВС? Решается ли задача выявления зон сложнопостроенных коллекторов венда и рифея на основе обработки и интерпретации данных многоволновой сейсморазведки МОГТ-2D-3С?

Мы считаем, что нам удалось на основе комплексного анализа данных МВС по ряду площадей Восточной Сибири, скважинных измерений, материалов петрофизики, физического и математического моделирования, а также литературных ис-

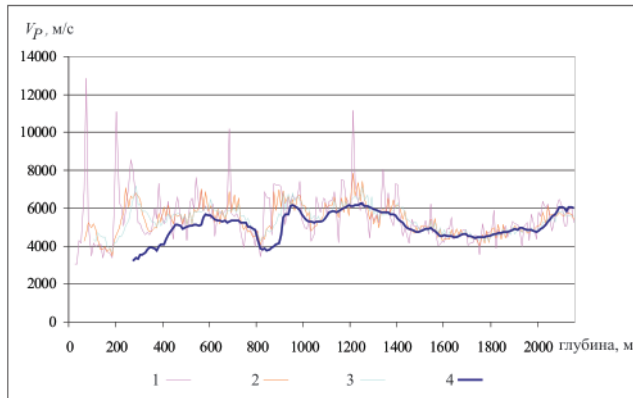


Рис. 1. Сопоставление скоростей и  $V_p$  ВСП при осреднении на интервале: 1 – 20 м, 2 – 60 м, 3 – 100 м, 4 –  $V_p$  АК при осреднении на интервале 100 м

точников и теоретических работ сформулировать и обосновать методологию выявления зон вертикальной трещиноватости в пластах карбонатных пород. Подход, используемый нами, основывается на вычислении коэффициента Пуассона и позволяет с использованием теоретических моделей [1, 2, 4] вычислять параметры трещиноватости и порозаполнителей. Открывается возможность определять анизотропные характеристики пород не на качественном, а на количественном уровне (по кинематическим и динамическим параметрам волн разных типов, их поляризации).

Другой важный результат работы состоит в создании на основе данных МВС методики оцен-

ки литологической принадлежности, степени трещиноватости, характера порозаполнения глубоко залегающих рифейских горизонтов, не вскрываемых глубоким бурением.

Рассмотрим интерпретацию данных МВС на примере сейсмических разрезов продольных и поперечных волн профиля 1608112 на южном склоне Байкитской антеклизы (рис. 2). Левая половина рисунка и нижняя часть правой – разрез продольных волн профиля 1608112, правая – разрез обменных поперечных волн профиля 1608112. Чтобы подчеркнуть достоверность обработки и взаимной увязки отражающих горизонтов на продольных и поперечных обменных волнах, разрез обменных волн сжат в 1,3 раза.

На рис. 2 на временных разрезах выделены и прослежены следующие отражающие горизонты:

$Y_{\text{salt}}$  – пачка доломитов в средней части усольской свиты;

$B_v$  – граница раздела между «подосинскими» солями усольской свиты и карбонатной тэтэрской;

$R_0$  – подошва вендских отложений (граница раздела между эродированными докембрийскими и венд-палеозойскими отложениями).

Горизонт  $Y_{\text{salt}}$  отличается наилучшей динамической выразительностью, прослежен по положительной фазе и является опорным для данной территории. Следующий по динамической выдержанности – горизонт  $B_v$ , который практически повсеместно представлен в виде двух интенсивных фаз,

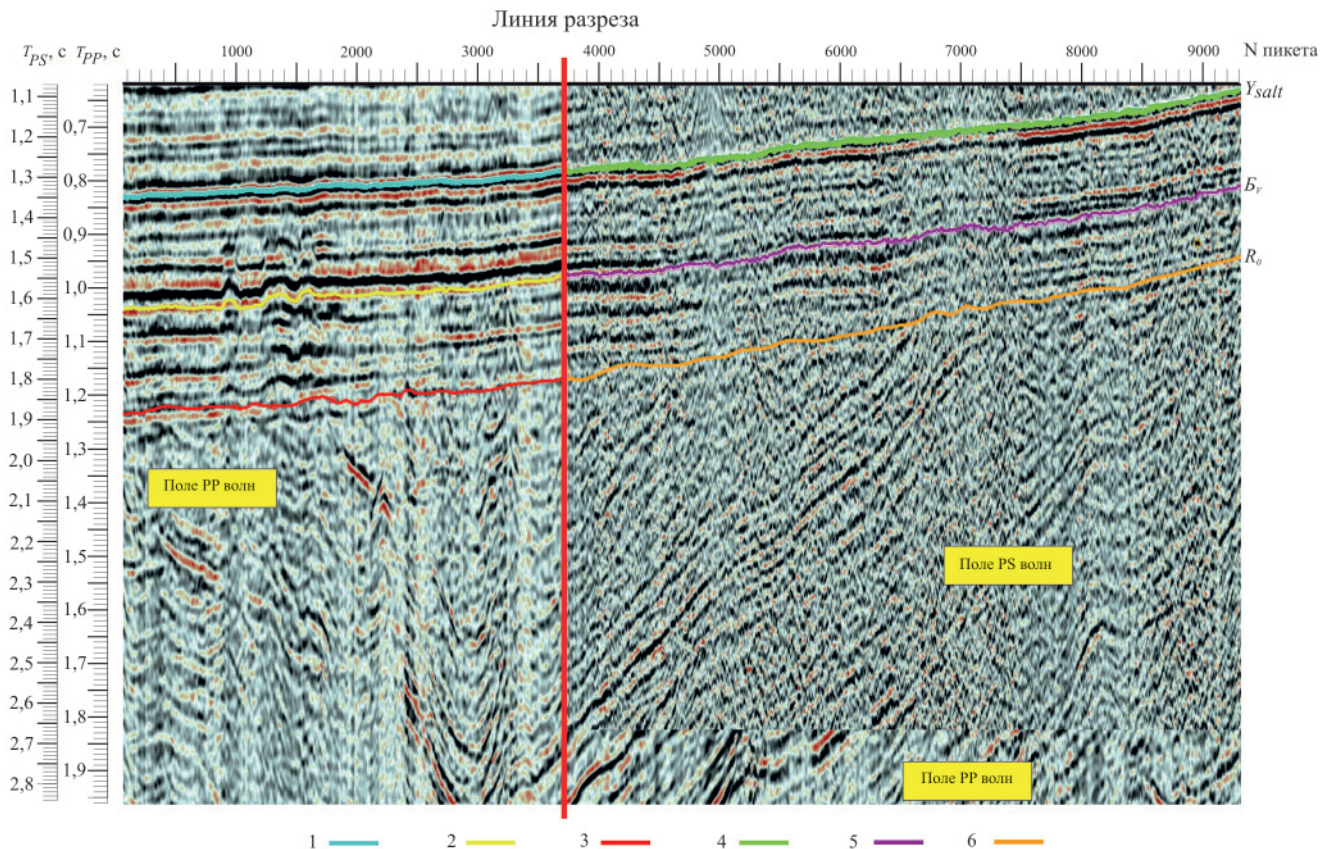


Рис. 2. Разрез продольных и поперечных волн по профилю 1608112 южного склона Байкитской антеклизы  
PP-волны: 1 – отражающий горизонт  $Y_{\text{salt}}$ , 2 –  $B_v$ , 3 –  $R_0$ ; PS-волны: 4 – отражающий горизонт  $Y_{\text{salt}}$ , 5 –  $B_v$ , 6 –  $R_0$



регистрируемых на временах от 760–900 мс на северо-востоке до 1100–1170 мс на юго-западе. Видимый период этого отражения составляет 45–50 мс.

Мы попытались для нормировки значений коэффициента Пуассона использовать данные по пластам солей. Как известно, каменная соль (грубокристаллический галит) встречается в виде массивных волокнистых или зернистых агрегатов. Осадочные породы, почти целиком состоящие из солей, залегают в форме куполов, линз или протяженных пластов. В Восточной Сибири данный тип горной породы характеризуется устойчивыми значениями скоростей и плотности. По каротажным данным Южно-Талаканской скв. 5411  $V_p = 4550$  м/с,  $V_s = 2590$  м/с,  $\rho = 2,2$  г/см<sup>3</sup>,  $\sigma = 0,26$ .

При анализе сейсмических данных мы ограничились только горизонтами, прослеживаемыми наиболее уверенно. Так, относительно высокие значения коэффициента Пуассона для отложений венда согласуются с результатами предшествующих работ. Породы представлены песчаниками, алевролитами, аргиллитами, присутствуют гравелиты и конгломераты. Песчаники преимущественно кварцевые. Встречаются прослои доломитов, мергелей доломитовых, доломито-ангидритов, ангидритов мощностью 10–135 м. Иначе говоря, высокие значения коэффициента Пуассона однозначно следует связывать с преобладанием глинистой водонасыщенной составляющей в разрезе. Понижение коэффициента Пуассона до 0,2–0,18 и менее можно связывать с преобладанием кварцевой составляющей и, как правило, с газовым насыщением. Из литературы известно, что присутствие уже около 5 % газа в порах формирует газонасыщенную характеристику породы.

Достаточно неожиданными оказались низкие значения  $\sigma$  для интервала усольской свиты – 0,2 и менее. По данным акустических измерений на керне Чайкинской скв. 279 можно считать, что коэффициенты Пуассона карбонатных пород должны быть больше 0,26. Таким образом, снижение значений коэффициента Пуассона до 0,2 и менее вряд ли можно объяснить принадлежностью к группе пород, попадающих под определение «доломит».

Как известно, доломиты часто оказываются существенно трещиноватыми. Однако достоверных методик оценки трещиноватости по сейсмическим данным *in situ* пока не найдено. Постараемся обосновать утверждение о связи пониженных значений коэффициента Пуассона с зонами трещиноватости.

Анализ различных гипотез позволил сформулировать достоверную, на наш взгляд, последовательность утверждений, которые дают необходимый ответ:

- Пласты солей характеризуются устойчивыми параметрами на всей изучаемой территории и не

могут иметь значения коэффициента Пуассона существенно меньше 0,26.

- Пониженные значения коэффициента Пуассона можно объяснить только присутствием в интервале усольской свиты тонких прослоев доломитов.

- Доломитам в силу их хрупкости и незначительной мощности под действием механических нагрузок в зонах наибольших деформаций свойственны многочисленные системы трещин, как правило вертикальных направлений.

- В зонах, где доломиты пронизаны системами вертикальных трещин (и, вероятно, частично насыщены газом), фиксируются пониженные значения коэффициента Пуассона.

Вполне убедительное подтверждение сформулированной гипотезы мы получили при изучении данных ВСП по Камовской скв. 1. Материал ВСП имеет вполне удовлетворительное качество, что позволило получить информацию по продольным, поперечным и обменным волнам. Несмотря на типичные претензии к точности определения интервальных скоростей, удалось построить кривые значений коэффициентов Пуассона по скважине (рис. 3).

На рис. 3 представлена кривая скорости  $V_p$  (по данным АК) и кривые коэффициентов Пуассона (по данным АК в инт. 2088–2426 м и ВСП по всей скважине). Несмотря на странное поведение параметра  $\sigma$  в карбонатных породах нижнебельской свиты, возникновение зон уплотнения и разуплотнения вполне объясняется теоретическими моделями сложного деформирования сред. На рис. 3 также демонстрируется кривая  $\sigma$ , полученная в результате АК. Хотя интервал сопоставления небольшой, но эти измерения позволили оценить достоверность получаемых значений коэффициентов Пуассона. Поскольку мы сопоставляем результаты независимых измерений, можно утверждать, что значения  $\sigma$  в пределах точности измерений совпадают и кривые  $\sigma$ , полученные обоими методами, достоверны.

Уменьшение значений коэффициентов Пуассона можно объяснить следующим образом. Как

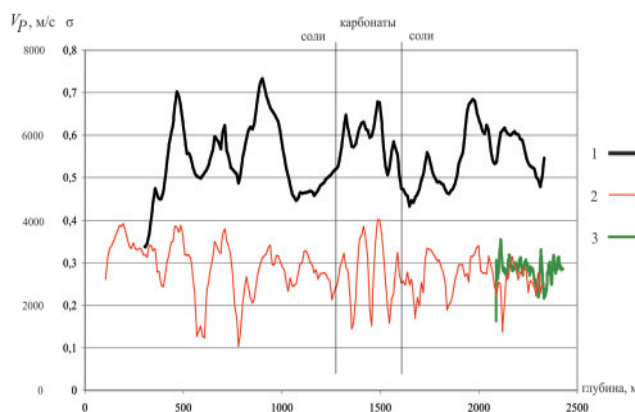


Рис. 3. Значение коэффициента Пуассона по данным ВСП Камовской скв. 1

1 –  $V_p$  (АК); 2 –  $\sigma$  (ВСП); 3 –  $\sigma$  (АК)



известно, трещинные зоны часто представляют в виде столбчатых или пластинчатых структур, т.е. порода рассекается вертикальными трещинами. Горизонтальные трещины на больших глубинах существовать не могут, так как они должны «схлопнуться» под действием литостатических нагрузок. Распространение волн в стержнях и пластинах хорошо изучено. Так, для стержней  $V_{st} = \sqrt{E/\rho}$ , где  $V_{st}$  – стержневая скорость,  $E$  – модуль Юнга,  $\rho$  – плотность. Для пластины «квази-продольная» скорость определяется следующим выражением [2]

$$V_{pl} = \frac{2V_S}{V_P} \sqrt{V_P^2 - V_S^2} = 2 \sqrt{\frac{\mu(\lambda + \mu)}{(\lambda + 2\mu)\rho}}$$

где  $\lambda$  и  $\mu$  – параметры Ламе;  $\rho$  – плотность;  $V_{pl}$  – пластинчатая скорость.

Значение пластинчатой («квазипродольной») скорости в таких структурах оказывается меньше: в доломитах меньше скорости продольной волны для массива на 5–10 % (по петрофизическим данным), а скорость поперечной SH-волны (в данном случае быстрой S-волны) не меняется и равна  $V_{SH} = \sqrt{\mu/\rho}$ . В совокупности такое изменение скоростей и приводит к уменьшению значений коэффициента Пуассона, который мы вычисляем по разнице интервальных времен продольных и поперечных волн.

Нам удалось также предложить метод, позволяющий достаточно надежно вычислять значения коэффициента Пуассона в рифейской части разреза. Подход основан на переходе от интервальных времен к производным по координате  $x$  (изменение расстояния по профилю).

Будем считать, что в некоторой области скорости  $V_P$ ,  $V_S$  постоянны. Тогда изменение времен  $T_{PP}$ ,  $T_{PS}$  для наклонных пластов зависит только от быстро меняющейся глубины погружения слоя  $h(x)$ . Для нахождения  $\gamma$  и  $\sigma$  получаем следующие выражения:

$$T_{PP} = 2 \frac{h(x)}{V_P}, T_{PS} = \frac{h(x)}{V_P} + \frac{h(x)}{V_S},$$

$$\frac{dT_{PP}}{dx} = 2 \frac{dh(x)}{dx} \frac{1}{V_P}, \frac{dT_{PS}}{dx} = \frac{dh(x)}{dx} \left( \frac{1}{V_P} + \frac{1}{V_S} \right);$$

$$\frac{dT_{PS}/dx}{dT_{PP}/dx} = \frac{\frac{dh(x)}{dx} (1/V_P + 1/V_S)}{2 \frac{dh(x)}{dx} \frac{1}{V_P}} = \frac{(1/V_P + 1/V_S)}{2 \frac{1}{V_P}} = \frac{1}{2} \left( 1 + \frac{V_P}{V_S} \right);$$

$$\frac{V_P}{V_S} = 22 \frac{dT_{PS}/dx}{dT_{PP}/dx} - 1; \gamma = \frac{1}{2 \frac{dT_{PS}/dx}{dT_{PP}/dx} - 1}; \sigma = \frac{1 - 2\gamma^2}{2(1 - \gamma^2)},$$

где  $T_{PP}$ ,  $T_{PS}$  – времена продольных и поперечных волн;  $h(x)$  – глубина до отражающего горизонта.

На рис. 4 продемонстрировано практическое использование метода. Приведены отрезки годографов, снятые с профиля 1608112. По оси абсцисс откладывается номер пикета  $N$  (расстоя-

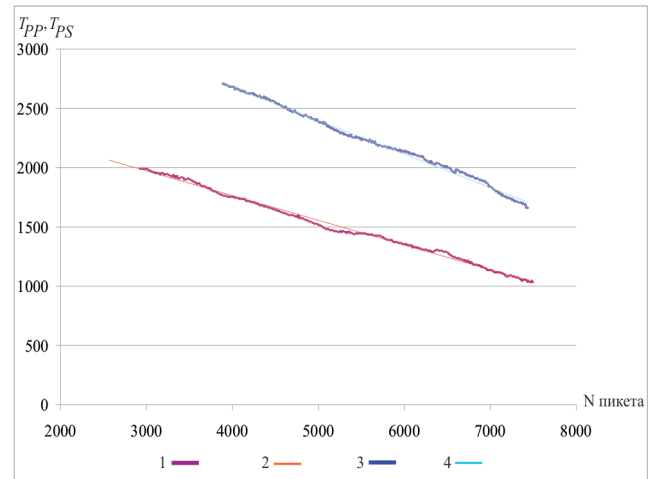


Рис. 4. Отрезки годографов, снятые с наклонных границ профиля 1608112 в рифейских отложениях

1 –  $T_{PP}$ , время продольной волны; 2 – линия тренда,  $T_{PP} = -0,2084 \cdot N + 2595,7$ ,  $R_2 = 0,994$ ; 3 –  $T_{PS}$  время поперечной волны; 4 – линия тренда,  $T_{PS} = -0,2812 \cdot N + 3804,8$ ,  $R_2 = 0,9939$

ние  $x$ ), по оси ординат время  $T_{PP}$  и  $T_{PS}$ . Значение  $dT_{PP}/dx = 0,2984$ ;  $dT_{PS}/dx = 0,2812$ , а  $\gamma = 0,5887$ ,  $\sigma = 0,2348$  (такие значения характерны для карбонатных пород, возможно, частично газонасыщенных).

Конечно, все представленные результаты носят предварительный характер и требуют дальнейшего подтверждения. Данные о понижении значений коэффициента Пуассона для трещинных пород приводятся в многочисленных публикациях, например [1], однако механизм отражения его в сейсмических параметрах, по-видимому, приводится нами впервые.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Бакулин, А. В. Эффективные сейсмические модели трещиноватых и пористых сред [Текст] / А. В. Бакулин, Л. А. Молотков. – СПб. : Изд-во СПбГУ, 1998. – 142 с.
2. Новацкий, В. Теория упругости [Текст] / В. Новацкий. – М. : Мир, 1975. – 872 с.
3. Типпи, Б. Мультикомпонентная сейсмика: новый старт? [Текст] / Б. Типпи // Oil & gas journal Russia. – 2011. – № 12. – С. 36–47.
4. Rüger, A. P-wave reflection coefficients for transversely isotropic models with vertical and horizontal axis of symmetry [Text] / A. Rüger // Geophysics. – 1997. – Vol. 62. – P. 713–722.

## REFERENCES

1. Bakulin A.V., Molotkov L.A. *Effektivnyye seismicheskie modeli treshchinovatykh i poristykh sred* [Effective seismic models of jointed and porous environments]. Saint-Petersburg, S.-Peter. Univ. Publ., 1998. 142 p. (In Russ.).
2. Novatskiy V. *Teoriya uprugosti* [Theory of elasticity]. Moscow, Mir Publ., 1975, 872 p. (In Russ.).



3. Tippi B. [Multicomponent seismic survey: new start?]. *Oil&Gas Journal Russia*, 2011, no. 12, pp. 36–47.

4. Rüger A. P-wave reflection coefficients for transversely isotropic models with vertical and horizontal axis of symmetry. *Geophysics*, 1997, vol. 62, pp. 713–722.

© В. З. Кокшаров, 2014

---

**КОКШАРОВ Валерий Зосимович**

Сибирский научно-исследовательский институт геологии, геофизики, и минерального сырья (СНИИГТиМС), Новосибирск, зав. лабораторией, к. т. н.

*E-mail: koksharov@sniiggims.ru*

**КОКШАРОВ Valeriy**, PhD, Siberian Research Institute of Geology, Geophysics and Mineral Resources, Novosibirsk, Russia

*E-mail: koksharov@sniiggims.ru*