

Copyright 2004, Instituto Brasileiro de Petróleo e Gás – IBP.

Este Trabalho Técnico Científico foi preparado para apresentação no 3º Congresso Brasileiro de P&D em Petróleo e Gás, a ser realizado no período de 2 a 5 de outubro de 2005, em Salvador. Este Trabalho Técnico Científico foi selecionado e/ou revisado pela Comissão Científica, para apresentação no Evento. O conteúdo do Trabalho, como apresentado, não foi revisado pelo IBP. Os organizadores não irão traduzir ou corrigir os textos recebidos. O material conforme, apresentado, não necessariamente reflete as opiniões do Instituto Brasileiro de Petróleo e Gás, Sócios e Representantes. É de conhecimento e aprovação do(s) autor(es) que este Trabalho será publicado nos Anais do 3º Congresso Brasileiro de P&D em Petróleo e Gás.

INFLUÊNCIA DA ARGILOSIDADE, POROSIDADE EFETIVA E DENSIDADE NAS VELOCIDADES COMPRESSIONAIS DE DISTINTAS LITOLOGIAS DO CAMPO DE NAMORADO

Julio Kosaka de Oliveira¹, José Agnelo Soares², Jorge Leonardo Martins³

^{1,2} Universidade Federal do Rio de Janeiro, Av. Brigadeiro Trompowski, s/n
Cidade Universitária, Rio de Janeiro, RJ, Brasil, CEP 21.945-970

¹jkolivei@uninet.com.br, ²agnelo@geologia.ufjf.br

³ Observatório Nacional – MCT, Rua Gal. José Cristino, 77, São Cristóvão,
Rio de Janeiro, RJ, Brasil, CEP 20.921-400

jlmartins@on.br

Resumo – Investigamos tendências de variação das velocidades compressoriais (V_p) em função da porosidade efetiva (ϕ_e), argilosidade (V_{arg}) e densidade (ρ_b) em litologias distintas (arenito Namorado, folhelho e mista) presentes no Campo de Namorado. Os valores de V_p , ϕ_e , V_{arg} e ρ_b foram obtidos a partir de dados de perfilagem de poços e de análise seqüencial de testemunhos (ANASETE). Utilizamos distintos modelos matemáticos para ajustar V_p às demais propriedades, e em cada ajuste também calculamos o coeficiente de correlação (R). A influência simultânea de V_{arg} e ϕ_e nos valores de V_p foi investigada a partir de um modelo de regressão linear. Os resultados indicam que, nas três litologias estudadas, V_p tende a diminuir com o aumento tanto de ϕ_e quanto de V_{arg} , sendo que ϕ_e exerce uma influência de maior peso que V_{arg} na dependência das velocidades. A magnitude dos coeficientes de correlação confere a estes ajustes um alto grau de confiabilidade. Por sua vez, o uso dos modelos de potência e polinomial no estudo das relações entre V_p e ρ_b indicam que V_p tende a crescer com o aumento de ρ_b nas três litologias selecionadas, com a magnitude dos coeficientes de correlação indicando um grau de confiabilidade mediano para esses ajustes.

Palavras-Chave: Campo de Namorado; velocidade compressional; perfilagem de poços; tendências.

Abstract – We investigated trends in the variation of compressional velocities (V_p) as a function of effective porosity (ϕ_e), shaliness (V_{arg}) and bulk density (ρ_b) in distinct lithologies (Namorado sandstone, shale and mixed lithology) present in the Namorado oil field. V_p , ϕ_e , V_{arg} and ρ_b values were obtained through data from well logs and sequential analysis of cores (ANASETE). We utilized different mathematical models for fitting V_p to the other properties, and for each fit we also calculated the correlation coefficient (R). The simultaneous influence of V_{arg} and ϕ_e in V_p values was investigated from a linear regression model. The outcomes indicate that V_p tends to decrease as ϕ_e and V_{arg} increase in the three lithologies studied, and ϕ_e exerts a greater influence in the variation of V_p in comparison to V_{arg} . The magnitude of the correlation coefficients shows a high degree of certainty for these fits. In turn, use of both the polynomial and power law mathematical models in the study of the relation between V_p and ρ_b indicates an increase of V_p with a corresponding increase in ρ_b in the three selected lithologies, and the magnitude of the correlation coefficients indicates a median degree of certainty for these fits.

Keywords: Namorado oil field; compressional velocity; well logging; trends.

1. Introdução

As velocidades sísmicas, isto é, as velocidades das ondas elásticas que se propagam nas rochas, são influenciadas por vários fatores, tais como: composição mineralógica, densidade, profundidade, porosidade, argilosidade, estado de tensões atuantes, saturação de fluidos, etc. Especificamente, porosidade e argilosidade ocupam papel de destaque na dependência das velocidades sísmicas de rochas-reservatório. A porosidade é uma propriedade física que representa o espaço de vazios preenchido pelo fluido (gás, óleo e/ou água). A argilosidade (ou volume de argila) é definida como a fração de argila presente na rocha. Das três formas de ocorrência de argila em reservatórios areníticos, a saber, argila laminar (formando microcamadas entre os grãos da matriz quartzosa), argila estrutural (formando agrupamentos granulares de argila entre os grãos da matriz quartzosa) e argila dispersa ou autigênica (minerais de argila envolvem os grãos da matriz quartzosa), esta última possui a maior relevância porque tende a ocupar os espaços porosos, obstruindo o fluxo dos fluidos através do reservatório. Quanto à porosidade, é um fato que ela também é afetada pela argilosidade, com reflexo direto em outras propriedades da rocha, como na permeabilidade e nas velocidades sísmicas (Miller & Stewart, 1990). Por conta da presença da argila nos poros da rocha, a porosidade total deve ser corrigida, resultando na porosidade efetiva que possibilita o armazenamento de fluidos no reservatório. Essa correção é feita a partir da interpretação de perfis geofísicos de poços e/ou medidas de laboratório.

Usando modelos matemáticos, o presente trabalho tem como objetivo investigar tendências de variação da velocidade compressional (V_p) em função da porosidade efetiva (ϕ_e), volume de argila (V_{arg}) e densidade efetiva (ρ_b) em distintas litologias que formam o pacote sedimentar associado ao reservatório Namorado na Bacia de Campos: o arenito Namorado, os folhelhos e litologias mistas. Através de um modelo linear, investigamos a influência simultânea de ϕ_e e V_{arg} sobre V_p empregando a metodologia de Tosaya & Nur (1982), Kowallis *et al.* (1984), Castagna *et al.* (1985), Han *et al.* (1986) e Miller & Stewart (1990). Por sua vez, estudamos os efeitos de ρ_b sobre V_p segundo modelos matemáticos de potência e polinomial conforme Gardner *et al.* (1974). Para avaliar o grau de confiabilidade dos ajustes matemáticos empregados, determinamos o coeficiente de correlação (R). As calibrações obtidas permitem mapear porosidade efetiva, argilosidade e densidade sobre o pacote sedimentar do Campo de Namorado sem a necessidade de execução de perfis geofísicos adicionais.

2. Descrição dos dados

Para executar as investigações mencionadas na seção anterior, utilizamos dados de perfilagem geofísica de poços e os ANASETE's pertencentes ao conjunto de dados Campo Escola de Namorado, cedido pela ANP (Agência Nacional do Petróleo) para fins didáticos às instituições brasileiras de ensino e pesquisa. Os dados de ANASETE correspondem a descrições de testemunhos. Os dados de perfilagem geofísica possuem medidas de propriedades físicas ao longo do pacote sedimentar do reservatório Namorado, a saber: sônico (DT, em $\mu\text{s}/\text{ft}$), raios- γ (GR, em unidades API), resistividade (ILD, em $\Omega\cdot\text{m}$), porosidade “neutrão” (PHIN, fração percentual) e densidade (RHOB, em g/cm^3). A partir das informações contidas no ANASETE, selecionamos as amostras para realização dos ajustes matemáticos em três litologias diferentes presentes no Campo de Namorado: arenito Namorado, folhelho e uma litologia mista. Cada litologia contém fácies distintas (vide a Tabela 1). Ao todo, obtivemos 966 amostras distribuídas ao longo de oito poços, sendo 516 amostras para o arenito Namorado, 60 para o folhelho e 390 para a litologia mista.

3. Metodologia

A metodologia que adotamos para determinação de ajustes matemáticos das dependências (linear) $V_p = V_p(\phi_e, V_{arg})$ e (polinomial e de potência) $V_p = V_p(\rho_b)$ seguiu a estimativa da porosidade efetiva e do volume de argila. Para tal, utilizamos as mesmas expressões fundamentais para interpretação dessas propriedades a partir de perfis geofísicos de poços.

3.1. Determinação da velocidade compressional (V_p)

Determinamos a velocidade compressional a partir das medidas dos tempos de trânsito intervalar referentes ao perfil sônico (DT), através de uma simples conversão de unidades ($\mu\text{s}/\text{ft}$ - km/s).

3.2. Determinação da argilosidade (V_{arg})

Calculamos a argilosidade a partir de expressões matemáticas empíricas de uso comum em perfilagem de poços. Adotamos, a seguir, o valor médio das estimativas fornecidas por cada expressão correspondente. Inicialmente, determinamos o índice de raios- γ (I_{GR}) através da relação

$$I_{GR} = \frac{GR_{\text{perfil}} - GR_{\text{sand}}}{GR_{\text{shale}} - GR_{\text{sand}}} \quad (1)$$

O termo GR_{perfil} se refere ao valor medido no perfil de raios- γ para cada amostra. As constantes GR_{sand} e GR_{shale} correspondem, respectivamente, aos valores mínimo e máximo registrados no perfil GR no intervalo sedimentar perfilado em cada poço. A argilosidade pode, então, ser calculada através das seguintes expressões:

$$V_{\text{arg1}} = 0.083 \left[2^{(3.7 \times I_{GR})} - 1 \right], \quad (2)$$

$$V_{\text{arg2}} = 0.33 \left[2^{(2 \times I_{GR})} - 1 \right], \quad (3)$$

$$V_{\text{arg3}} = 1.7 - \sqrt{3.38 - (I_{GR} + 0.7)^2}. \quad (4)$$

Segundo Larionov (1969), as equações (2) e (3) se aplicam a sedimentos terciários ou recentes e em rochas mesozóicas ou anteriores, respectivamente. Isso se deve à variação do I_{GR} com a idade geológica da rocha. Clavier *et al.* (1977) consideram a equação (4) mais apropriada a rochas recentes.

Finalmente, adotamos para V_{arg} o valor corresponde à média aritmética dos resultados das equações (2), (3) e (4), ou seja,

$$V_{\text{arg}} = \frac{V_{\text{arg1}} + V_{\text{arg2}} + V_{\text{arg3}}}{3} \times 100\%. \quad (5)$$

O principal motivo para adotarmos a média aritmética é a composição arcoseana da litologia arenito Namorado. O perfil GR é sensível à radiação do potássio (K) presente nos grãos de K-feldspato da fração areia. A adoção do valor médio de V_{arg} certamente conduziu à suavização dos efeitos dessa radiação na resposta do perfil GR nessa litologia.

Tabela 1. Descrição de cada fácies presente nas litologias arenito Namorado, folhelho e litologia mista.

Litologia	Fácies	Descrição
arenito Namorado	arenito grosso amalgamado	camadas métricas, base areia muito grossa a conglomerática e topo areia grossa. Delgados níveis de gradação inversa/normal na base.
arenito Namorado	arenito médio laminado	camadas com até 1 m de espessura com um <i>trend</i> de gradação normal com base areia grossa e topo areia fina. Laminações plano-paralelas-carpets.
arenito Namorado	arenito médio gradado	composição arcoseana, bem selecionado, aspecto maciço, gradação às vezes incipiente ou do tipo cauda grossa.
arenito Namorado	arenito médio cimentado	equivalente à fácies arenito médio gradado, porém cimentado.
arenito Namorado	arenito cimentado com deformação	arenito médio, com deformações internas – escorregamentos – e cimentado. Clastos em arranjo desordenado, mal selecionados e angulosos – aspecto brechóide.
folhelho	folhelho radioativo	folhelho siltico laminado de cor cinza escuro, moderadamente bioturbado. Apresenta altos valores de raios-gama devido ao conteúdo de material fosfático.
folhelho	interlaminado siltito/folhelho deformado	formam níveis irregulares de espessura variável de silte cinza claro e folhelho cinza escuro bioturbados.
litologia mista	interlaminado lamoso deformado	camadas de até 1 m com intercalações de calcilito, marga e folhelho. Feições de deformação (escorregamento).
litologia mista	ritmito	intercalações rítmicas de calcilito, marga e folhelho em camadas de até 1 m de espessura.

3.3. Determinação da porosidade efetiva (ϕ_e)

Para o cálculo da porosidade efetiva usamos as relações a seguir:

$$\phi_{Se} = \frac{\Delta t_{\text{perfil}} - \Delta t_{ma}}{\Delta t_f - \Delta t_{ma}} \times \frac{100}{\Delta t_{sh}} - V_{\text{arg}} \left(\frac{\Delta t_{sh} - \Delta t_{ma}}{\Delta t_f - \Delta t_{ma}} \right), \quad (6)$$

$$\phi_{De} = \frac{\rho_{ma} - \rho_{\text{perfil}}}{\rho_{ma} - \rho_f} - V_{\text{arg}} \left(\frac{\rho_{ma} - \rho_{sh}}{\rho_{ma} - \rho_f} \right), \quad (7)$$

$$\phi_{NDe} = \frac{\phi_N - (V_{arg} \times \phi_{Nsh}) + \phi_{De}}{2} \quad (8)$$

Os termos Δt_{perfil} , ρ_{perfil} e ϕ_N são, respectivamente, as medidas dos perfis DT, RHOB e PHIN para cada amostra. As constantes Δt_{ma} e Δt_f representam os tempos de trânsito intervalar da matriz rochosa (51 $\mu s/ft$) e do fluido de perfuração (189 $\mu s/ft$), respectivamente. As densidades ρ_{ma} e ρ_f são as densidades da matriz (2.65 g/cm³) e da lama de perfuração (1.0 g/cm³). A equação (5) conduz ao cálculo de V_{arg} . Por fim, Δt_{sh} , ρ_{sh} e ϕ_{Nsh} são constantes apenas para cada poço, e correspondem, respectivamente, ao tempo de trânsito intervalar, à densidade e à medida do perfil PHIN num ponto típico de folhelho no intervalo sedimentar em consideração.

Para o valor de ϕ_e de cada amostra adotamos a média aritmética dos resultados das equações (6), (7) e (8), logo,

$$\phi_e = \frac{\phi_{Se} + \phi_{De} + \phi_{NDe}}{3} \times 100\% \quad (9)$$

3.4. Determinação da densidade (ρ_b)

As medidas no perfil RHOB fornecem as densidades (ρ_b) das 966 amostras selecionadas.

4. Resultados

Mostramos a seguir os resultados das dependências $V_p = V_p(\phi_e, V_{arg})$ e $V_p = V_p(\rho_b)$. Os valores máximos, mínimos e médios de V_p , V_{arg} , ϕ_e e ρ_b encontrados para cada litologia estão representados na Tabela 2.

Tabela 2. Valores máximos, mínimos e médios de V_p , V_{arg} , ϕ_e e ρ_b para cada litologia.

Litologia	arenito Namorado	folhelho	litologia mista
V_p máxima (km/s)	5.30	3.93	5.58
V_p mínima (km/s)	2.72	2.96	3.55
V_p média (km/s)	3.50	3.23	4.34
V_{arg} máxima (%)	46	98	27
V_{arg} mínima (%)	6	9	1
V_{arg} média (%)	15	45	9
ϕ_e máxima (%)	41	21	15
ϕ_e mínima (%)	3	8	2
ϕ_e média (%)	22	15	8
ρ_b máxima (g/cm ³)	2.62	2.51	2.71
ρ_b mínima (g/cm ³)	1.95	2.28	2.36
ρ_b média (g/cm ³)	2.29	2.36	2.59

4.1. Influência de ϕ_e e V_{arg} nos valores de V_p

A influência simultânea da porosidade efetiva e da argilosidade nas velocidades compressoriais, isto é, $V_p = V_p(\phi_e, V_{arg})$, verificadas nas litologias arenito Namorado, folhelho e mista são expressas nas equações lineares (10), (11) e (12) a seguir, respectivamente,

$$V_p = -0.0573\phi_e - 0.0172V_{arg} + 4.9919 \quad (10)$$

$$V_p = -0.0582\phi_e - 0.0145V_{arg} + 4.7634 \quad (11)$$

$$V_p = -0.1143\phi_e - 0.0261V_{arg} + 5.4295 \quad (12)$$

Nas equações acima, V_p é expressa em km/s, e ϕ_e e V_{arg} em %. Os resultados desses ajustes lineares estão representados na Figura 1. Nesta figura, o eixo vertical representa a razão $V_p(\text{calc})/V_p(\text{obs})$, onde o termo $V_p(\text{calc})$ corresponde à velocidade compressional calculada a partir das equações (10), (11) e (12), e o termo $V_p(\text{obs})$ se refere ao valor da velocidade compressional obtido diretamente a partir do perfil sônico. Observamos nas litologias investigadas que a velocidade compressional tende a diminuir com o aumento tanto da porosidade efetiva quanto da argilosidade, sendo que, matematicamente falando, ϕ_e exerce uma influência de maior peso nos valores de V_p . Isto está de acordo com os resultados obtidos por Tosaya & Nur (1982), Kowallis *et al.* (1984), Castagna *et al.* (1985), Han *et al.* (1986) e Miller & Stewart (1990). Note que a magnitude dos coeficientes de correlação, $R = 0.8502$, $R = 0.8930$ e $R = 0.9571$ para os ajustes lineares representados pelas equações (10), (11) e (12), respectivamente, garantem a cada um dos ajustes grau de confiabilidade muito bom.

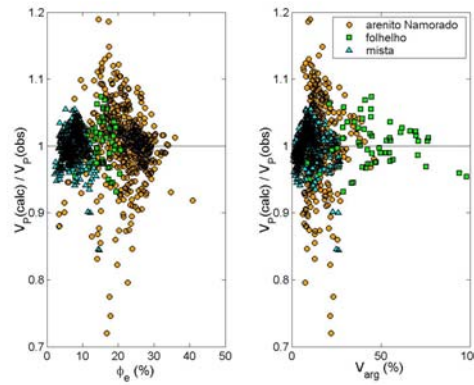


Figura 1. Influência da porosidade efetiva e da argilosidade na velocidade compressional, $V_p = V_p(\phi_e, V_{arg})$.

4.2. Relações entre V_p e ρ_b

A relação entre a velocidade compressional e a densidade, isto é, $V_p = V_p(\rho_b)$, segundo o modelo de potência usado em Gardner *et al.* (1974), para as litologias arenito Namorado, folhelho e mista, são representadas nas equações (13), (14) e (15), respectivamente,

$$\rho_b = 1.6040(V_p^{0.2832}) \quad , \quad (13)$$

$$\rho_b = 1.9838(V_p^{0.1471}) \quad , \quad (14)$$

$$\rho_b = 2.2264(V_p^{0.1032}) \quad . \quad (15)$$

Para esses ajustes, obtivemos os seguintes coeficientes de correlação: $R = 0.6154$, $R = 0.5237$ e $R = 0.6876$, respectivamente. Por sua vez, as dependências $V_p = V_p(\rho_b)$ segundo o modelo polinomial (Gardner *et al.*, 1974), para cada litologia sob investigação, estão expressas nas equações (16), (17) e (18), respectivamente,

$$\rho_b = -0.0701V_p^2 + 0.7085V_p + 0.6766 \quad ; \quad (16)$$

$$\rho_b = 0.2022V_p^2 - 1.2606V_p + 4.3078 \quad ; \quad (17)$$

$$\rho_b = -0.0520V_p^2 + 0.5159V_p + 1.3382 \quad . \quad (18)$$

com os respectivos coeficientes de correlação: $R = 0.6274$, $R = 0.5964$ e $R = 0.7173$. Nas equações (13) a (18), V_p é expressa em km/s, e ρ_b em g/cm³.

Diferentemente da porosidade efetiva e argilosidade, a velocidade compressional agora tende a crescer com o aumento da densidade. Os gráficos dos ajustes relacionados às equações (13), (14) e (15) estão representadas na Figura 2. Para os ajustes com as equações (16), (17) e (18), os resultados se encontram na Figura 3. Essas figuras mostram tendência semelhante àquelas obtidas em Gardner *et al.* (1974), com exceção da equação (17) que exibe uma concavidade oposta às curvas dos demais ajustes polinomiais. Atribuímos essa tendência ao baixo número de amostras para a litologia folhelho (60 amostras) em comparação ao arenito Namorado (516 amostras) e à litologia mista (390 amostras). Observamos um grau de confiabilidade mediano, a partir dos respectivos coeficientes de correlação para os ajustes nas equações (13) a (18).

5. Conclusões

As velocidades compressoriais observadas nas litologias arenito Namorado, folhelho e mista, presentes no Campo de Namorado, tendem a diminuir com o aumento tanto da porosidade efetiva quanto da argilosidade. A porosidade efetiva ϕ_e exerce uma influência de maior peso nos valores de V_p , em comparação ao volume de argila nas litologias investigadas. Considerando os coeficientes de correlação associados aos ajustes matemáticos utilizados em cada litologia, obtivemos um grau de confiabilidade muito bom. Ressaltamos, mais uma vez, que a composição arcoseana da litologia arenito Namorado provavelmente está influenciando os valores de V_{arg} aqui calculados. Para minimizar esses efeitos, adotamos a média aritmética de V_{arg} a partir de relações empíricas utilizadas em perfilagem geofísica de poços. Por outro lado, as velocidades compressoriais dessas litologias tendem a crescer com o aumento da

densidade. Os médios coeficientes de correlação obtidos conferem um grau de confiabilidade mediano para esses ajustes. Por fim, a curva referente ao modelo polinomial para a litologia folhelho apresentou um comportamento distinto das demais devido ao baixo número de amostras selecionadas para essa litologia. Portanto, para essa litologia, o ajuste polinomial não representa uma dependência fisicamente correta para certos intervalos da densidade.

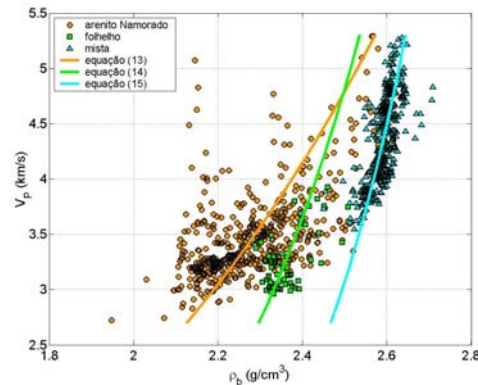


Figura 2. Relação entre a velocidade compressional e a densidade segundo modelo de potência.

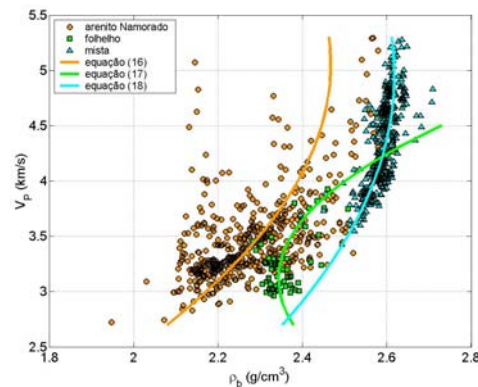


Figura 3. Relação entre a velocidade compressional e a densidade segundo modelo polinomial.

6. Agradecimentos

Os autores agradecem à Agência Nacional do Petróleo (ANP) pelo apoio técnico e financeiro do Programa de Capacitação de Recursos Humanos em Geologia do Petróleo da UFRJ (PRH-ANP/MCT No. 18) na realização deste trabalho. A cooperação do Prof. Jadir da Conceição da Silva, do Depto. de Geologia da UFRJ, é aqui reconhecida.

7. Referências

- CASTAGNA, J.P., BATZLE, M.L. & EASTWOOD, R.L., 1985. Relationships between compressional-wave and shear-wave velocities in clastic silicate rocks: *Geophysics*, **50**, 571-581.
- CLAVIER, C., COATES, G. & DUMANOIR, J., 1977. The theoretical and experimental bases for the “dual water” model for the interpretation of shaly sands. Soc. of Professional Engineers of AIME, Denver, SPE 6859.
- GARDNER, G.H.F., GARDNER, L.W. & GREGORY, A.R., 1974. Formation velocity and density – The diagnostic basis for stratigraphic traps: *Geophysics*, **39**, 770-780.
- HAN, D-H., NUR, A. & MORGAN, D., 1986. Effects of porosity and clay content on wave velocities in sandstones: *Geophysics*, **51**, 2093-2107.
- KOWALLIS, B.J., JONES, L.E.A. & WANG, H.F., 1984. Velocity-porosity-clay content systematics of poorly-consolidated sandstones: *Journal of Geophysical Research*, **89**, 10355-10364.
- LARIONOV, V. V., 1969. Radioactivity by Well Log. Nedra, Moscow (in Russian).
- MILLER, S.L.M. & STEWART, R.R., 1990. Effects of lithology, porosity and shaliness on P- and S-wave velocities from sonic logs: *Canadian Journ. of Expl. Geophysics*, **26**, 94-103.
- TOSAYA, C. & NUR, A., 1982. Effects of diagenesis and clays on compressional velocities in rocks. *Geophys. Res. Lett.*, **9**, 5-8.