

Д. В. Малицький, О. С. Федоришин, П. І. Хекало

Карпатське відділення Інституту геофізики ім. С. І. Субботіна, Львів

ПРОГНОЗУВАННЯ НАФТОГАЗОНОСНОСТІ ГІРСЬКИХ ПОРІД З ВИКОРИСТАННЯМ ШВИДКОСТЕЙ ПРУЖНИХ ХВИЛЬ, КОЕФІЦІЄНТІВ ПОГЛИНАННЯ ТА РЕКУРЕНТНИХ СПІВВІДНОШЕНЬ

Анотація: Обґрунтовано доцільність застосування фізичного і математичного моделювання для знаходження ефективних фізичних характеристик гірських порід. Проведено дослідження процесів поширення сейсмічних хвиль в вертикально-неоднорідному середовищі, а також у тріщинувато-пористих гірських масивах з врахуванням загасання хвиль. Встановлено кореляційні зв'язки та емпіричні залежності між колекторськими властивостями (пористість, тріщинуватість, проникливість) і параметрами пружних хвиль для зовнішньої зони Передкарпатського прогину. На основі аналізу отриманих результатів розроблено методику прогнозування фізичних і колекторських властивостей порід-колекторів та оцінки їх нафтогазоносності. Критерії прогнозування нафтогазоносності підтверджені апробацією методики на реальних матеріалах промислової геофізики.

Ключові слова: пористість, колектор, математичне моделювання, гірська порода, рекурентні співвідношення, тріщинувато-пористе середовище, характеристична матриця.

Д. В. Малицкий, О. С. Федоришин, П. И. Хекало. ПРОГНОЗИРОВАНИЕ НЕФТЕГАЗОНОСНОСТИ ГОРНЫХ ПОРОД С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ СКОРОСТЕЙ УПРУГИХ ВОЛН, КОЕФИЦИЕНТОВ ПОГЛОЩЕНИЯ И РЕКУРРЕНТНЫХ СООТНОШЕНИЙ.

Аннотация: Обоснована целесообразность применения физического и математического моделирования для нахождения эффективных физических характеристик горных пород. Проведено исследование процессов распространения сейсмических волн в вертикально-неоднородной среде, а также в трещино-пористых горных массивах с учетом затухания волн. Установлены корреляционные связи и эмпирические зависимости между колекторскими свойствами (пористость, трещинность, проницательность) и параметрами упругих волн для внешней зоны Предкарпатского прогиба. На основании анализа полученных результатов разработана методика прогнозирования физических и колекторских свойств пород-колекторов и оценки их нефтегазоносности. Критерии прогнозирования нефтегазоносности подтверждены апробацией методики на реальных материалах промышленной геофизики.

Ключевые слова: пористость, колектор, математическое моделирование, горная порода, рекуррентные соотношения, трещино-пористая среда, характеристическая матрица.

D. V. Malytskyy, O. S. Fedoryshyn, P. I. Kchekalo. PROGNOSTICATION OIL AND GAS SATURATION OF MOUNTAINS BREEDS WITH USE OF SPEEDS OF FLEXIBLE WAVES, ABSORPTION COEFFICIENTS AND RECCURENT CORRELATIONS.

Abstract: An expediency of physical and mathematical modeling for finding of effective physical descriptions of rocks was proved on analysis base of publication and manuscript data grounded application. Processes of seismic waves propagation in vertically-heterogeneous medium and in crackity-porous rocks

massifs with wave attenuation and dissipation have been studied. Correlative relations and empiric dependencies between collectors features (porosity, crackness, perspicacity) and parameters of elastic waves for the Outer zone of Carpathian foredeep have been determined. A method for prediction of oil and gas saturated rocs and gas saturation has been developed on the base of obtained results. Obtained criterious for prediction of oil and gas saturativity using endorsed by methods approbation on real materials of industrial geophysicist was proved.

Keywords: porosity, collector, mathematical modeling, rock, reccurent relationship, cracked-porous medium, characteristic matrix.

1. ВСТУП

Сучасний стан економіки України настійно вимагає розвідки нових родовищ нафти і газу. Для вирішення цих завдань в сучасній геофізиці і геодезії використовуються різні методи. Достовірність прогнозу нафтогазоносності гірських порід суттєво збільшується при комплексному використанні методів розвідки і врахуванні конкретних геолого-геофізичних умов. Експериментальні дослідження нафтогазоносних структур підтверджують доцільність такого підходу. Отже, виникає потреба у розробці нових та вдосконаленні традиційних методів знаходження ефективних характеристик гірських порід, а також у встановленні фізичних залежностей між колекторськими властивостями і параметрами пружних хвиль. Відомо, що застосування традиційних структурних методів геофізичних досліджень і глибокого буріння не забезпечує необхідної результативності геолого-розвідувальних робіт. Тому прогноз колекторських параметрів за даними геофізичних досліджень з використанням сучасних технологій і програмних забезпечень відкриває принципову можливість визначення нафто-газових продуктивних шарів. Дані численних експериментальних досліджень вітчизняних і зарубіжних вчених вказують на тісний зв'язок між параметрами пружних хвиль і колекторськими властивостями. Крім того, надзвичайно важливим в цьому напрямку є дослідження поширення сейсмічних хвиль в геологічних середовищах з врахуванням мікроструктури. Є прямі експериментальні дані, що підтверджують вплив мі-

кротріщин на зміну модулів пружності, причому затухання пружних хвиль достатньо чутливе до зміни структури твердої фази. Отже, вплив анізотропії на хвильову картину може бути значним, тому її слід враховувати при дослідженні поширення сейсмічних хвиль в гірських породах.

На основі вищевикладеного можна стверджувати, що на всіх етапах прогнозу та розвідки покладів нафти і газу важливим є визначення пористості, проникливості та флюїдовмісту досліджуваного розрізу. Метою даного дослідження є розробка методики точного прогнозу нафтогазоносності в тому чи іншому регіоні. Для досягнення цієї мети слід провести повну інтерпретацію сейсмічних даних, що означає побудову математичної і фізичної моделей досліджуваного середовища і розв'язування прямих і обернених задач сейсміки, а також прогнозування колекторських властивостей гірських порід та оцінок їх нафтогазоносності.

Проведені основні дослідження – розробка та вдосконалення статистичних методів знаходження фізичних параметрів гірських порід, дослідження процесів поширення пружних хвиль в мікронеоднорідних середовищах, встановлення кореляційних зв'язків та емпіричних залежностей між колекторськими властивостями порід-колекторів та параметрами пружних хвиль з використанням рекурентних співвідношень – мали кінцевою метою розробку методики високої точності прогнозу нафтогазоносності гірських порід у тому чи іншому регіоні.

2. ТЕОРЕТИЧНІ ОСНОВИ ПІДВИЩЕННЯ ТОЧНОСТІ ІНТЕРПРЕТАЦІЇ АКУСТИЧНИХ ДАНИХ

Дослідження фізико-механічних характеристик геологічних середовищ (гірських порід) проводилося в багатьох роботах. В результаті проведених лабораторних досліджень встановлено, що зі збільшенням пористості гірських порід до 20 % швидкість поширення поздовжньої звукової хвилі в них зменшується на 30 %. Швидкість поперечної хвилі майже в 3 рази чутливіша до зміни пористості, ніж швидкість поздовжньої хвилі. Водночас зі зміною швидкості збільшується і в'язкість порід на 20 %, а хвильовий опір зменшується у 2 рази. Під дією на зразок зовнішнього тиску до 80 МПа пористість, а разом з тим і хвильовий опір зменшуються на 14 %, причому швидкість поздовжньої хвилі в зразках з пористістю менше 10 % складає приблизно 10 %, а в більш пористих – до 40 %. Дещо менше змінюється швидкість поперечної хвилі. Коефіцієнт Пуассона, поміряний вздовж площини орієнтації тріщин або шаруватості менший, а по нормалі до площини орієнтації – більший, ніж його значення для суцільного однорідного середовища. Зі збільшенням тиску до 80 МПа коефіцієнт Пуассона, поміряний вздовж площини анізотропії, збільшується майже в 5 разів, а по нормалі до неї – практично не змінюється. Під дією зовнішнього тиску найбільші зміни всіх фізичних характеристик відбуваються в діапазоні 0,1–40 МПа. При тисках, більших 40 МПа, досліджувані величини змінюються значно менше. Сухі і частково насичені гірські породи мають меншу швидкість поширення і значно більший коефіцієнт затухання, ніж ті ж самі зразки, але повністю насичені рідиною.

Аналіз експериментальних даних на зразках гірських порід, отриманих в результаті буріння свердловин (кернів), показав велику відмінність у швидкостях поширення поздовжніх пружних хвиль значень, отрима-

них у результаті акустичного каротажу. Це залежить перш за все від зміни структури зразка в результаті виймання його з природного середовища. Великі градієнти зміни фізичних характеристик гірських порід при низьких і середніх тисках пояснюють зазвичай закриттям мікротріщин. Правильність цього припущення підтверджується результатами досліджень електропровідності і проникливості в насичених пористих гірських породах. Є також прямі експериментальні дані, які підтверджують, що мікротріщини впливають на зміну модулів пружності при підвищенні тиску значно сильніше, ніж пористість. Появою мікротріщин в середовищі можна пояснити також різке зменшення амплітуди ультразвуку при напруженнях близько 3/4 руйнівного. Причому відомо, що затухання пружних хвиль більш чутливе до зміни структури твердої фази, ніж до швидкості їх поширення. Геометрична структура пор в гірських породах впливає також на зміну їх властивостей в процесі насичення. Максимальне збільшення швидкості пружних хвиль спостерігається в тріщинуватих гранітах, а найменше – в гранітах з порами, близькими до сферичних.

Експериментальними дослідженнями показано, що головним фактором, який визначає анізотропію швидкості пружних хвиль, є орієнтація видовжених пустот різної форми – дископодібних чи голкоподібних. Тому навіть якщо сам матеріал скелета породи ізотропний, в цілому порода цілком може бути анізотропною. Це явище широко відоме в механіці композитних матеріалів.

Для пояснення поведінки швидкостей пружних хвиль відомі різні теоретичні моделі. Першими були роботи Фойгта [1] і Ройсса [2]. В них усереднення проводились пропорційно до об'ємної частки кожної фази породи. Такий підхід прийнятний тільки для порід з невеликою різницею між властивостями фаз і зовсім не годиться для пористих середовищ, оскільки швидкості поширення хвиль в пустотах до-

рівнюють нулю. Більш точною моделлю усереднення є формули Хашина–Штрікмана, які базуються на енергетичному підході [3]. В цьому випадку модулі пружності визначаються на основі принципу мінімуму потенціальної енергії (енергія деформації в твердому тілі потенціально). Результати, отримані по верхній границі формул Хашина–Штрікмана, дають непогані результати для пористих середовищ, в яких геометрична форма пор близька до сферичної. Нижня границя в формулах Хашина–Штрікмана дорівнює нулю, тому ці формули, хоч і дають добрі результати для деяких типів порід, для повноцінного дослідження їх властивостей непридатні. Найбільш прийнятними є дослідження, що базуються на строгому математичному підході до постановки задач механіки деформованого твердого тіла з використанням сучасних методів теорії випадкових функцій.

Якщо за основу взяти двохфазну модель гірської породи, то її механічні параметри (ефективні модулі пружності, швидкості поширення хвиль, коефіцієнти затухання) є функціями від чотирьох змінних:

$$M = f(M_1, M_2, \varphi, \gamma), \quad (2.1)$$

де M – механічний параметр, φ – об'ємна концентрація включень (пор), γ – структурний параметр [4]. Отже, для точного визначення фізичних та геометричних параметрів необхідно також мати чотири вимірювальних параметри. Такими можливими вимірювальними параметрами можуть бути швидкості поширення поздовжніх та поперечних хвиль V_p , V_s , а також коефіцієнти затухання α_p , α_s . Теоретичні дослідження для модулів пружності або швидкостей поширення проведені досконально в багатьох роботах [5–7]. Проте коефіцієнти затухання в двохфазних середовищах досліджені ще недостатньо. Для побудови математичної моделі двофазного в'язкопружного середовища будемо виходити з моделі Фойхта:

$$\sigma^d = 2\mu(\varepsilon^d + \tau\dot{\varepsilon}^d), \quad (2.2)$$

тут σ^d , ε^d – девіаторні частини тензорів напружень та деформацій, τ – час релаксації.

В пористих гірських породах скелет породи зазвичай є пружним. В'язко-пружним є заповнювач пор (рідина або глина). В зв'язку з цим розглянемо двофазне середовище з пружним скелетом та в'язко-пружними включеннями. Закон Гука для кожної компоненти запишемо у вигляді

$$\sigma_1 = K_1\varepsilon_1; \quad \sigma_{1ij}^d = \mu_1\varepsilon_{1ij}^d; \quad (2.3)$$

$$\sigma_2 = K_2\varepsilon_2; \quad \sigma_{2ij}^d = \mu_2\varepsilon_{2ij}^d + \mu_2\tau\dot{\varepsilon}_{2ij}^d. \quad (2.4)$$

Далі, використовуючи методи усереднення, які базуються на теорії випадкових функцій, для в'язко-пружних середовищ (2.3) та (2.4) отримаємо

$$\sigma = K\varepsilon + K_\tau\dot{\varepsilon}; \quad \sigma_{ij}^d = \mu\varepsilon_{ij}^d + \mu_\tau\dot{\varepsilon}_{ij}^d. \quad (2.5)$$

Тобто, не зважаючи на те, що в'язкість врахована тільки в одній компоненті (і тільки зсувна в'язкість), середовище в цілому отримує як зсувну, так і стисливу в'язкість.

Розглянемо тепер рівняння руху для такого середовища, використавши закон Гука у вигляді (2.5). Отримаємо:

$$\sigma_{ij,j} = 0; \quad \sigma = K\varepsilon + K_\tau\dot{\varepsilon}; \\ \sigma_{ij}^d = \mu\varepsilon_{ij}^d + \mu_\tau\dot{\varepsilon}_{ij}^d; \quad \varepsilon_{ij} = 1/2(u_{i,j} + u_{j,i}). \quad (2.6)$$

Якщо взяти розв'язок рівняння (2.6) у вигляді плоскої хвилі, то отримаємо

$$u_i^P = A_i^P \exp\left(-\frac{K + 4/3\mu}{K_\tau + 4/3\mu_\tau}t\right) \times \\ \times \exp(\vec{k}_p\vec{r} - \omega t); \quad (2.7)$$

$$u_i^S = A_i^S \exp\left(-\frac{\mu}{\mu_\tau}t\right) \exp(\vec{k}_p\vec{r} - \omega t). \quad (2.8)$$

Формули (2.7) та (2.8) дають зв'язок переміщення на досліджуваній поверхні з в'язкопружними коефіцієнтами кожної з компо-

нент. Таким чином, ми отримали зв'язок коефіцієнтів затухання для поздовжньої та поперечної хвиль з модулями пружності компонент та часом релаксації однієї з компонент. А це означає, що ми отримуємо два додаткових параметри, придатних для інтерпретації акустичних та сейсмічних даних в гірських породах, зокрема на свердловинах.

3. МАТЕМАТИЧНЕ МОДЕЛЮВАННЯ В ЗАДАЧАХ СЕЙСМОЛОГІЇ І ЙОГО ЗАСТОСУВАННЯ ДЛЯ НАФТОГАЗОПОШУКОВИХ РОБІТ

В наш час питання пошуку нафтогазових родовищ за допомогою геофізичних, в тому числі сейсмічних методів та вивчення внутрішньої будови земної кори надзвичайно актуальні. Існують різні точки зору і щодо механізмів вогнища землетрусу, визначення його характеристик. Багато вчених моделюють вогнище у вигляді зсувної дислокації, використовуючи при цьому модель Брюна або Хаскелла [8, 9]. Ряд вчених використовують більш складні моделі [10, 11]. Зрозуміло, що кожен підхід має свої переваги і недоліки. Розв'язання задачі визначення характеристик вогнища землетрусу відкриває один із напрямів до вирішення проблеми прогнозування. Позитивні результати вищезгаданих проблем значною мірою залежать від вибору математичної і фізичної моделей як для досліджуваного середовища, так і для вогнища землетрусу.

В даній роботі розглядається розроблений Малицьким Д. В. [12–14] рекурентний метод для розв'язування прямої і оберненої динамічних задач сейсміки. В попередніх статтях [12–14] розглядалося середовище, яке моделювалося системою плоских однорідних ізотропних шарів на півпросторі, границі між якими були паралельними. Автор одержав рекурентні співвідношення для хвильового поля на вільній поверхні [14]. На основі прямої задачі були одержані також рекурентні формули для

параметрів середовища. Слід відзначити, що ця методика дає можливість розв'язувати динамічні задачі сейсмології для джерел, які моделювалися зсувною дислокацією. Задаючи геометрію сейсмічного джерела і його параметри, а також характеристики досліджуваного середовища, можна одержати рекурентні співвідношення для хвильового поля. Джерело сейсмічних хвиль може знаходитися на вільній поверхні, всередині середовища або в $(n + 1)$ -півпросторі. В даній статті, як і в попередніх, розглядається двовимірна P - SV -задача.

Таким чином, для n -шаруватого середовища на $(n + 1)$ -півпросторі із джерелом сейсмічних хвиль на i -й границі [13]

$$Z_{n+1} = D^{n+1,i+1} \cdot \bar{F} + D \cdot W_1(0), \quad (3.1)$$

де Z_i – компоненти амплітуд падаючих і відбитих P і S хвиль в i -му шарі; $W_1(0) = (U_r^{(0)}, U_z^{(0)}, T_{rz}^{(0)}, T_{zz}^{(0)})^T$ – компоненти амплітуд зміщень і напружень на вільній поверхні; $\bar{F} = (F_1, F_2, F_3, F_4)^T$ – компоненти джерела сейсмічних хвиль (стрибки зміщень і напружень на i -й границі); $D = D^{n+1,i+1} \cdot D_{i,1}$ – характеристична матриця досліджуваного середовища.

Аналізуючи формулу (3.1), можна одержати рекурентні співвідношення для визначення хвильового поля $U_z^{(0)}$ і $U_r^{(0)}$ [14]. Слід ще раз зазначити, що одержана методика розроблена для випадку, коли границі між шарами паралельні.

Розглянемо P - SV -задачу для середовища, яке моделюється системою n - шарів на $(n + 1)$ -півпросторі, де границі між шарами непаралельні. В загальному випадку розглядаються шари середовища, розділені криволінійними границями S_i , які можна математично представити у такому вигляді:

$$Z_i(r) = d_i + h_i(r), d \geq -h(r). \quad (3.2)$$

Для прикладу розглянемо модель "шар на півпросторі", як це показано на рис. 1.

Отже, замість товщин d_i ми вводим функції $Z_i(r)$ згідно з (3.2). Можна показати, що загальний вигляд рекурентних співвідношень при цьому не зміниться, тобто хвильове поле на вільній поверхні буде [15]:

$$u_z^{(0)} = \frac{1}{2n} \int_{-\infty}^{\infty} \left[\int_0^{\infty} U_z^{(0)}(r, w, z) J_0(kr) dk \right] \cdot e^{jwz} dw,$$

$$u_r^{(0)} = \frac{1}{2n} \int_{-\infty}^{\infty} \left[- \int_0^{\infty} U_r^{(0)}(k, w, z) J_1(kr) dk \right] \cdot e^{jwz} dw.$$

Тут

$$U_z^{(0)} = -\tilde{F}_2 + \frac{d_{13}d_{31} - d_{11}d_{33}}{d_{11}d_{32} - d_{12}d_{31}} \tilde{F}_3 + \frac{d_{14}d_{31} - d_{11}d_{34}}{d_{11}d_{32} - d_{12}d_{31}} \tilde{F}_4;$$

(3.3)

$$U_r^{(0)} = -\tilde{F}_1 + \frac{d_{12}d_{33} - d_{13}d_{32}}{d_{11}d_{32} - d_{12}d_{31}} \tilde{F}_3 + \frac{d_{12}d_{34} - d_{14}d_{32}}{d_{11}d_{32} - d_{12}d_{31}} \tilde{F}_4,$$

де (d_{ij}) – елементи матриці D .

Основна відмінність одержаних співвідношень у порівнянні з методикою для паралельних шарів полягає у визначенні величин (див. формули (4) із [14]):

$$x_1^{(i)} = e^{-\alpha_i r} \left[-1 + \frac{\mu_i}{2\mu_{i+1}} g_i \cdot e^{k\beta_i(\alpha_{i+1} + \beta_{i+1})} \right]$$

$$x_2^{(i)} = e^{k\beta_i r} \left[-1 + \frac{\mu_i}{\mu_{i+1}} \cdot e^{-k\beta_i(\alpha_{i+1} + \beta_{i+1})} \right]$$

(3.4)

$$x_3^{(i)} = e^{-k\beta_i r} \left[1 + \frac{\mu_i}{2\mu_{i+1}} \cdot e^{k\beta_i(\alpha_{i+1} + \beta_{i+1})} \right]$$

$$x_4^{(i)} = e^{k\beta_i r} \left[g_{i+1} - \frac{\mu_i}{2\mu_{i+1}} g_i \cdot e^{-k\beta_i(\alpha_{i+1} + \beta_{i+1})} \right],$$

де μ_i – модуль зсуву в i -му шарі, k – хвильове число, $g_i = 1 + \beta_i^2$.

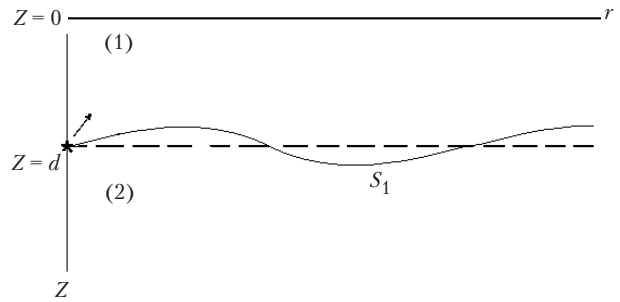


Рис. 1. Модель середовища з криволінійною границею S_1 . Вільна поверхня – горизонтальна, а точкове джерело знаходиться в точці Z

Для прикладу розглянемо модель із двох шарів (див. табл. 1), розділених поверхнею:

$$Z(r) = \begin{cases} d + \frac{C}{2} \left(1 + \sin \frac{2\pi(r-3000)}{w} \right), & |r| \leq w, \\ d, & |r| \geq w \end{cases} \quad (3.5)$$

де $d = 5000$ м, $C = 250$ м, $w = 5000$ м.

Нехай точкове джерело сейсмічних хвиль, яке задається функцією $\vec{F} = (0, F_2, 0, 0)^T$, знаходиться так, як показано на рис. 1. Вважаємо, що функція джерела залежить від r у вигляді функції Дірака, а залежність від часу, як в моделі Брюно:

$$F_2(t) = H_0 \cdot (1 - e^{-\frac{t}{T}}),$$

де T – час встановлення.

На рис. 2 показано сейсмограми сейсмічних хвиль на вільній поверхні для компоненти $u_z^{(0)}(t)$, одержаної від такого джерела в точках $r = 1000$, $r = 2000$, $r = 5000$ м, якщо два

Таблиця 1. Фізичні параметри для моделі середовища "шар на півпросторі"

№ пор.	$V_p, \frac{M}{c}$	$V_s, \frac{M}{c}$	d_i, M	μ_i, Pa
1	2 500	1 360	5 000	$3,514 \cdot 10^9$
2	4 516	2 348	-	$1,294 \cdot 10^{10}$

шари розділені криволінійною границею, математично представленою у вигляді (3.5) (синтетичні сейсмограми 1, 2, 3), а також, якщо шари розділені границею, паралельною до вільної поверхні (синтетичні сейсмограми 1а, 2а, 3а). Прийmemo $T = 0,05$ с і $H_0 = 1$.

На основі теоретичних розрахунків визначення часу пробігу хвиль можна показати хвильову картину (див. рис. 2), яка підтверджує правильний підбір математичної моделі і рекурентного методу. Криволінійність границі суттєво не змінює хвильової картини. Незначна відмінність спостерігається на епіцентральної відстані $r = 5\,000$ м. Слід зазначити, що дана методика може успішно використовуватися для більшого числа шарів

та криволінійних границь, а також для розв'язування обернених динамічних задач, що буде показано в наступних роботах.

4. ТЕОРЕТИЧНІ ДОСЛІДЖЕННЯ ФІЗИЧНИХ І КОЛЕКТОРСЬКИХ ВЛАСТИВОСТЕЙ ГІРСЬКИХ ПОРІД

4.1. Нелінійна пружність гірських порід

Докладне визначення фізичних і колекторських властивостей пористих порід дають лабораторні дослідження. На швидкість поширення пружних хвиль у гірській породі великий вплив має зовнішнє навантаження та пористість породи. На градієнт зміни швидко-

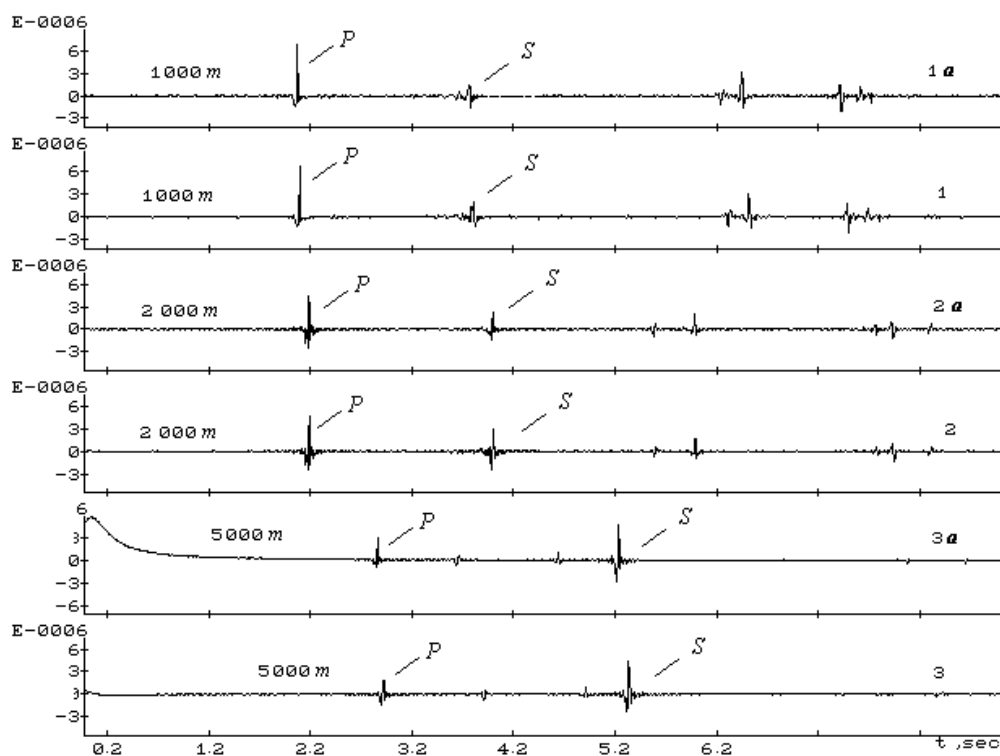


Рис. 2. Величина $u_z^{(0)}(t)$ – компонента переміщення на вільній поверхні для моделі середовища "шар на півпросторі", одержана для епіцентральної відстаней 1 000; 2 000; 5 000 м. Синтетичні сейсмограми 1а, 2а, 3а одержані для випадку постійної товщини верхнього шару (паралельність границь). Синтетичні сейсмограми 1, 2, 3 одержані для випадку криволінійної границі між шарами, що математично представлено у вигляді (3.5). Джерело сейсмічних хвиль розглядається як функція Дірака по r і як модель Брюно по t

сті від зовнішнього навантаження найбільше впливає тріщинна пористість. При зростанні зовнішнього навантаження на породу (більшій глибині залягання її в реальних умовах) значна частина мікротріщин закривається, а це, в свою чергу, приводить до збільшення швидкостей поширення пружних хвиль у породі. Пори кавернозного типу в породі впливають незначно на зміну швидкостей. Це вказує на тріщинну природу нелінійної пружності гірських порід. Експериментальні дослідження [16, 17] підтверджують нелінійну пружність гірських порід. Теоретичні залежності, покладені в основу роботи [18], також вказують на нелінійну пружність, що залежить від тиску, тобто зовнішнього навантаження на породу і довільних об'ємних концентрацій включень. У цій же роботі, з використанням зв'язку величин швидкостей поздовжніх і поперечних хвиль в сухому та флюїдонасиченому середовищах за умов низького та високого тисків, були одержані рекурентні співвідношення, що дають змогу прогнозувати пружні параметри сухої породи:

$$\frac{1}{K_i^c} = \frac{1}{M_{i+1}^c} + \frac{5-v_1}{3} \left(\frac{1}{M_i^e} - \frac{1}{M_{i+1}^e} - \frac{4}{15} \left[\frac{1}{K_i^e} - \frac{1}{K_{i+1}^e} \right] \right), \quad (4.1)$$

$i = 1, 2, \dots, n-1;$

$$\frac{1}{K_{i-1}^c} = \frac{1}{K_i^c} + \frac{15(2-v_1)}{4(5-v_1)} \left(\frac{1}{M_{i-1}^c} - \frac{1}{M_i^c} \right), \quad (4.2)$$

$i = n, n-1, \dots, 2.$

де $K_i^B, M_i^B, K_i^c, M_i^c$ – пружні модулі всебічного тиску і зсуву породи з рідкими включеннями і сухої при тиску P_i ; v_1 – коефіцієнт Пуассона твердої фази породи.

На основі формул (4.1), (4.2) проводились співставлення швидкостей поширення пружних хвиль у сухій породі з даними роботи [19]. Побудовані графічні залежності співставлення швидкостей поздовжніх і поперечних хвиль підтверджують нелінійну пружність породи. Використання нелінійної моделі двофазного геологічного середовища має практичне зна-

чення для встановлення зв'язку між параметрами неоднорідності середовища та його пружними характеристиками при використанні обмежених лабораторних та геофізичних даних. Рекурентні співвідношення (4.1), (4.2) разом з іншими геофізичними даними будуть використовуватися для підвищення ефективності геофізичних методів при пошуку і розвідці покладів нафти і газу.

4.2. Вивчення фізичних і колекторських властивостей гірських порід за експериментальними даними

Існує багато наукових праць, присвячених експериментальному вивченню пружних властивостей осадових порід в умовах, близьких до пластових. У роботах наводяться дані, які вказують на те, що пружні властивості гірських порід є дуже чутливими до дії зовнішніх фізичних умов і їх пружність значною мірою залежить від властивостей флюїда, що є заповнювачем пор, від тиску та пористості й інших структурних особливостей породи. Вивчення фізичних і колекторських властивостей зразків гірських порід в умовах, близьких до пластових, є необхідним етапом при пошуку та розвідці покладів нафти і газу. Застосування традиційних структурних методів геофізичних досліджень структурного і глибокого буріння не забезпечує необхідної ефективності пошуку та розвідки вуглеводнів. Отже, необхідні дані не тільки про будову, а й про фізичні властивості досліджуваного геологічного району. Крім того, такі роботи потребують значних фінансових затрат. Встановити зв'язки між пружними і колекторськими параметрами пористої породи можна лише експериментальними дослідженнями зразків гірських порід різного віку і складу з глибоких свердловин. Такі зв'язки були встановлені в роботі [20]. У цій же роботі показаний механізм одержання таких зв'язків. Спочатку за рекурентними співвідношення-

ми (4.1), (4.2) проводилися розрахунки пружних характеристик зразків сухих порід. За цими даними для Зовнішньої зони Передкарпатського прогину методом найменших квадратів були одержані емпіричні формули, що функціонально пов'язують зовнішнє навантаження, відкриту пористість і обернену величину пружного модуля всебічного стиску для породи з рідкими включеннями і сухої породи:

$$\beta^\circ = 1.893 - 2.72 \cdot 10^{-3} \cdot P^\circ + \frac{0.27 \cdot \varphi}{(P^\circ)^{0.186}}, \quad (4.3)$$

$$\beta^\circ = 2.014 - 4.12 \cdot 10^{-3} \cdot P^\circ + \frac{0.939 \cdot \varphi}{(P^\circ)^{0.364}}, \quad (4.4)$$

$$\beta^\circ = \beta \cdot 10^{11} \text{ Па}, \quad P^\circ = \frac{P}{P_0}; P_0 = 1 \text{ МПа},$$

де φ – відкрита пористість породи в %.

Проводилися порівняння одержаних значень за емпіричними формулами (4.3), (4.4) з експериментальними даними. Було встановлено, що при малих тисках від 0,1 до 5,0 МПа відхилення від експериментальних даних не перевищувало 20 %, а при тисках від 20 до 80 МПа такі відхилення не перевищували 11 %. В реальних умовах залягання порід, де тиски високі, можна вважати, що точність одержаних емпіричних формул є достатньою для їх практичного застосування в Зовнішній зоні Передкарпатського прогину. Відомо, що породи-колектори в Зовнішній зоні Передкарпатського прогину і Донецько-Дніпровській западині, як і в інших геологічних районах, істотно відрізняються між собою за фізико-механічними властивостями. Тому константи, які входять в емпіричні формули (4.3), (4.4), повинні уточнюватися.

4.3. Прогнозування нафтогазоносності порід-колекторів

при геофізичному дослідженні свердловин
Геофізичне дослідження свердловин широко

використовується під час пошуку і розвідки нафтових і газових родовищ для виділення порід-колекторів при визначенні їх пружних і колекторських властивостей (пружних модулів, швидкостей поздовжніх і поперечних хвиль, їх співвідношення, відкритої пористості, густини і інших параметрів) та оцінки їх нафтогазоносності.

Для інтерпретації геофізичних досліджень в свердловинах при застосуванні нових перспективних прямих методів акустичного (АК) та сейсмічного (СК) каротажу були використані як теоретичні, так і емпіричні залежності між пружними параметрами і колекторськими властивостями гірських порід. З метою прогнозування колекторських властивостей пористих порід були встановлені зв'язки між пружними параметрами неоднорідного середовища (4.1, 4.2) за допомогою нелінійної моделі двофазного геологічного середовища, що описує реальні гірські породи.

За експериментальними даними по Зовнішній зоні Передкарпатського прогину були отримані емпіричні залежності (4.3), (4.4) між стисливістю пористої породи, її відкритою пористістю та дією на неї ефективного тиску.

В КВ ІГФ НАН України розроблена програма розрахунку пружних і колекторських параметрів порід-колекторів і оцінки їх нафтогазоносності на базі теоретико-емпіричних залежностей та даних АК або СК.

Розрахунки пружних і колекторських параметрів порід-колекторів і оцінки їх нафтогазоносності проводилися за вказаною програмою з використанням даних щодо пластових швидкостей поздовжніх хвиль, наданих ЗУГРЕ, по свердловинах площ Пиняни, Залужани, Лопушна.

Так, свердловиною Пн-8 були відкриті продуктивні пласти в інтервалі глибин 1 598–2 040 м, де був виявлений приплив газу. На глибині 2 040 м і глибше породи-колектори виявились обводненими. А свердловиною Зл-3 був відкритий піщано-глинистий розріз в ін-

Інноваційні проекти Національної академії наук України

тервали глибин 40–3 156 м. Цей розріз не мав промислової цінності, бо на цьому інтервалі глибин нафтопроявів не спостерігалось. Свердловиною Зл-1 з проектною глибиною 2 500 м за даними промислової геофізики було ви-

пробувано 6 об'єктів. В інтервалі глибин 1 720–1 694 м та 1 829–1 792 м було отримано приплив води, тобто на цих інтервалах глибин породи-колектори обводнені. А на глибинах 1 930–1 918 м та 2 015–2 000 м було отримано

Таблиця 2. Фізичні і колекторські параметри порід-колекторів і оцінка їх нафтогазоносності по свердловині Зл-1

Залужани-1; $H=2\ 547$ м						
Дані ЗУГРЕ		Прогноз (за методом)			Дані промислової геофізики	
H , м	$V_p(i)$, м/с	$K_{п}$, %	V_s / V_p	Глибина продуктивних пластів, м	$K_{п}$, %	Глибина продуктивних пластів, м
400 – 950	3 300	21,0 – 17,0	0,418	Вода	7,3; 4,1; 8,9;	1 720 – 1 694 м; вода
950 – 1 350	3 650	16,5 – 15,0	0,460	Вода	8,9; 12,8;	1 829 – 1 792 м; вода
1 350 – 1 875	3 450	14,5 – 20,0	0,456	Вода	-	1 930 – 1 918 м; газ
1 900 – 2 500	3 450	18,3 – 16,5	0,586 – 0,587	Сухий пласт або газ	12,8; 13,4;	2 015 – 2 000 м; газ; $P = 22,8$ МПа
					12,7;	2 190 – 2 135 м; газ; $P = 22,45$ МПа
						2 285 – 2 257 м; газ+вода
						2 440 – 2 3 87м; вода

Таблиця 3. Фізичні і колекторські параметри порід-колекторів і оцінка їх нафтогазоносності по свердловині Лп-13

Лопушна-13; $H = 5260$ м						
Дані ЗУГРЕ		Прогноз (за методом)			Дані промислової геофізики	
H , м	$V_p(i)$, м/с	$K_{п}$, %	V_s / V_p	Глибина продуктивних пластів, м	$K_{п}$, %	Глибина продуктивних пластів, м
165 – 750	2 428 – 4 125	8,0 – 18,0	0,441 – 0,45	Вода	5 136 – 5 224 м	4 430 м; розгазов; пач. пластів
750 – 1 500	4 125 – 3 786	5,0 – 15,0	0,45 – 0,47	Вода	6,6; 9,0	5 030 – 5 042 м; вода+нафта
1 500 – 2500	3 786 – 4 374	3,5 – 17,0	0,47 – 0,48; 0,58	1 560 м; сухий, газ		5 106 – 5 090 м; вода+газ
2 500 – 3 500	4 374 – 4 920	3,0 – 12,0	0,45 – 0,48	Вода		5 142 – 5 130 м; вода; розгазов.
3 500 – 4 250	4 920 – 4 381	5,0 – 15,0	0,46 – 0,49; 0,58	4 100 м; сухий пласт або газ		5 171 – 5 156 м; вода
4 250 – 5 130	4 381 – 5 196	2,5 – 15,0		Вода		5 213 – 5 190 м; вода

приплив газу. Слабий приплив газу з водою було отримано в інтервалі глибин 2 282–2 257 м. На глибинах 2 440–2 387 м породи-колектори були обводнені. За даними АК пористість порід на різних інтервалах глибин різна і в середньому змінюється від 12,7 до 14,6 %. Свердловиною Лп-13 були виявлені такі відкладення: манявські, стебницькі, баденські, вельветські, крейдяні і юрські. В інтервалі глибин 2 034–5 150 м був виконаний відбір керна матеріалу. На глибинах 2 094–4 482 м залягають алевроліти і аргіліти, а потім породи переходять у пісковики. Глибше 3 700 м пісковики чергуються з аргілітами. На глибині 5 000 м і глибше залягають переважно вапняки. Сейсмокаротаж по свердловині проводився до глибини 5 100 м. Перспективними в

нафтогазоносному відношенні є юрські відкладення. Вони переважно складені з товщ вапняків, колекторські властивості яких змінюються в широких межах. Так, в інтервалі глибин 5 224–5 136 м виявлені пласти-колектори порово-кавернозного типу, пористість яких по АК складає 6,6–9,0 %, а значення загальної пористості по НГК – 11,0–15,0 %. На глибині 4 430 м газовловлюючою станцією протягом 90 хв було зафіксовано пачку розгазованого розчину. В інтервалі глибин 5 090–5 042 м було отримано приплив флюїду (вода з нафтою), а на глибинах 5 106–5 090 м було отримано воду з газом, де з пластової води виділявся горючий газ, а на поверхні води виділялася плівка нафти.

Проведені співставлення фізичних і колекторських властивостей порід-колекторів і

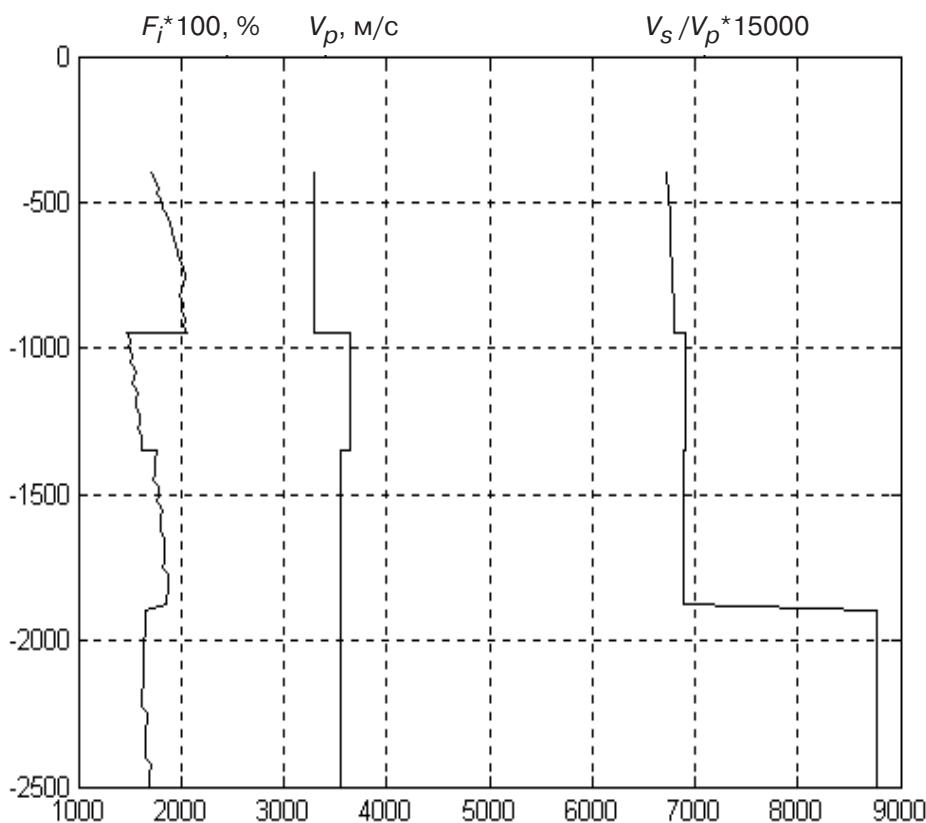


Рис. 3. Свердловина Зл-1, $H = 2 547$ м. Графічні залежності відкритої пористості, пластової швидкості поздовжньої хвилі і співвідношення швидкостей поперечної до поздовжньої хвиль від глибини по свердловині Зл-1

оцінка їх нафтогазоносності за теоретико-емпіричними залежностями з даними промислової геофізики наведені в таблицях 2, 3. На рисунках 3, 4 наведені графічні залежності відкритої пористості, пластової швидкості поздовжньої хвилі і співвідношення швидкостей поперечної хвилі до поздовжньої від глибини по свердловинах Залужани-1 і Лопушна-13.

Запропонований метод (в основу його покладені теоретико-емпіричні залежності між пружними і колекторськими параметрами порід) дозволяє відділити газонасичені породи-колектори від порід-колекторів з рідкими включеннями (пластова вода, нафта) під час геофізичних дослідження свердловин. Проте вказаний метод не дає можливості розпізнати породи-колектори, насичені пластовою водою або нафтою, за пластовою швидкістю поздовжньої хвилі через дуже малу розділь-

ну здатність між ними, наявну в межах похибок при визначенні пластових швидкостей поздовжніх хвиль. Необхідні подальші дослідження порід з рідкими включеннями з використанням не тільки даних АК або СК, а й параметрів поглинання енергії пружних хвиль.

5. ВИСНОВКИ

В результаті виконання науково-дослідних робіт по розробці методик оцінки колекторських властивостей гірських порід на основі теоретико-експериментального аналізу даних геофізичних спостережень у пористих середовищах були отримані такі основні результати:

1. Розроблено теоретичні основи оцінки колекторських властивостей гірських порід на основі комплексного аналізу даних геофізичних спостережень.

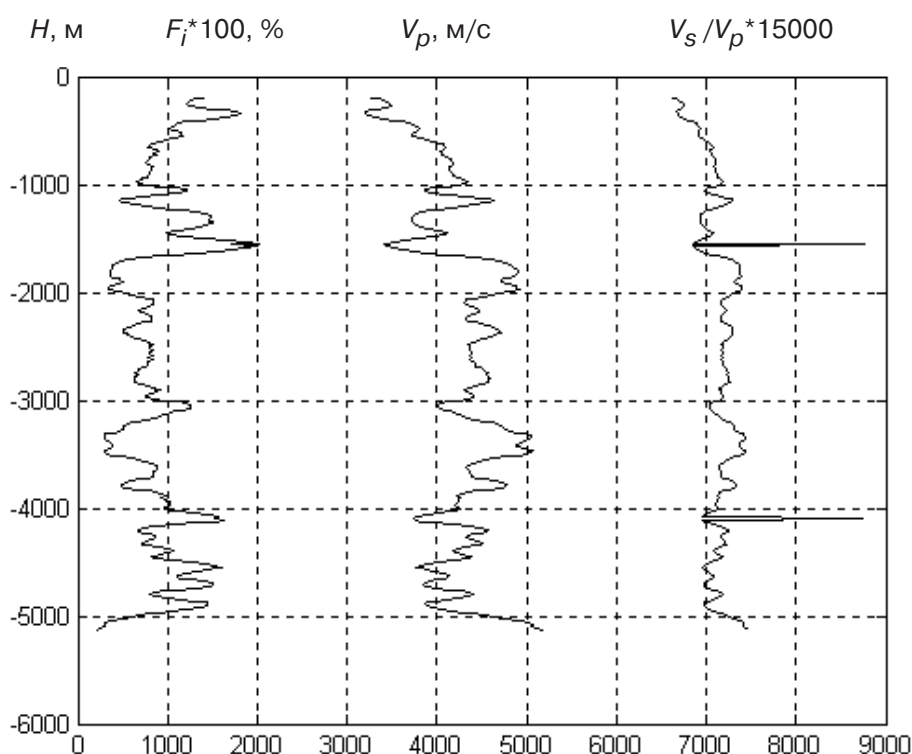


Рис. 4. Свердловина Лп-13, $H = 5270$ м. Графічні залежності відкритої пористості, пластової швидкості поздовжньої хвилі і співвідношення швидкостей поперечної до поздовжньої хвиль від глибини по свердловині Лп-13

2. Досліджено вплив анізотропії, поглинання, дисперсії при поширенні пружних хвиль в неоднорідних середовищах, що суттєво підвищує точність прогнозу нафтогазоносності гірських порід.
3. Виведено і проаналізовано математичні співвідношення для визначення інтенсивності розсіяних хвиль на мікронеоднорідностях з врахуванням обмінних ефектів.
4. Розроблено математичний апарат і програму для розрахунку швидкості розповсюдження пружних хвиль в тріщинувато-пористому середовищі з довільним заповненням пор та їх геометрії, а також розрахунку коефіцієнта розсіяння багатофазного середовища.
5. Розроблена методика визначення хвильового поля на вільній поверхні неоднорідного середовища, що моделюється системою однорідних ізотропних шарів.
6. На основі рекурентного методу запропонована методика поширення сейсмічних хвиль в середовищах з різнонахиленими границями, що може на якісно вищому рівні використовуватись при картуванні геологічних об'єктів.
7. Виведені і проаналізовані емпіричні співвідношення, що пов'язують зовнішнє навантаження, відкрити пористість і обернену величину модуля об'ємного стискання для порід з рідкими вклученнями та сухих порід на прикладі Зовнішньої зони Передкарпатського прогину.
8. Запропоновано методику прогнозування нафтогазоносності порід-колекторів при геофізичних дослідженнях свердловин.

Одержані результати свідчать, що теоретичні дослідження поширення пружних хвиль в складчасто-побудованих середовищах можна успішно використати для прогнозування нафтогазоносності гірських порід. Крім того, використання методики прогнозування фізичних і колекторських властивостей порід-колекторів знаходить своє застосу-

вання при геофізичних дослідженнях свердловин, що було проілюстровано і перевірено даними промислової геофізики. Запропоновані підходи є обнадійливими і потребують, поряд з теоретичними дослідженнями, подальшого опрацювання.

ЛІТЕРАТУРА

1. **Voigt W.** Lehrbuch der Kristallphysik. – Berlin: Teubner. – 1928. – 962 s.
2. **Reuss A.** Berechnung der Fließgrenze von Mischkristallen auf Grund der Plastizitätsbedingung für Einkristalle. – Z. Angew. Math. and Mech. – 1929. – № 1. – S. 49–52.
3. **Hachin Z., Strickman S.** A variational approach to the theory of the elastic behaviour of multiphase materials, J. Mech. Phys. Solids 11 – 1963. – № 2. – P. 127–140.
4. **Вербицкий Т. З., Починайко Р. С., Стародуб Ю. П., Федоришин А. С.** Математическое моделирование в сейсморазведке. – К.: Наук. думка. – 1985. – 275 с.
5. **Шермергор Т. Д.** Теория упругости микронеоднородных сред. – М.: Наука. – 1977. – 400 с.
6. **Хорошун Л. П.** Прогнозирование термоупругих свойств материалов, упрочненных однонаправленными дискретными волокнами. // Прикл. механика. – 1974. – № 12. – С. 23–30.
7. **Федоришин А. С.** Прогнозирование свойств микронеоднородных материалов с различными типами вклучений. // Мат. методи та фіз.-мех. поля. – 1999. – 42, № 2. – С. 136–140.
8. **Аки К., Ричардс Г.** Количественная сейсмология. Теория и методы – М.: Мир. – 1983. – Т. 1, 2. – С. 880.
9. **Касахара К.** Механика землетрясений – М.: Мир. – 1985. – С. 262.
10. **Jochen Braunmiller, Torsten Dahm and Klaus – Peter Bonjer.** Source mechanism of the 1992 Roermond, the Netherlands, earthquake from inversion of regional surface waves (extended abstract). // Geologie en Mijnbouw. – 1994. – P. 73, 225–227.
11. **T. Dahm and F. Kruger.** Higher-degree moment tensor inversion using far-field broad-band recordings: theory and evaluation of the method with application to the 1994 Bolivia deep earthquake. // Geophys. J. Int., 137. – 1999. – P. 35–50.
12. **Вербицкий Т. З., Малицкий Д. В.** Рекуррентный подход к решению обратных задач сейсмологии. // Геофиз. журн. – 1995. – № 5. – С. 47–52.
13. **Малицкий Д. В.** Основные принципы развязывания динамической задачи сейсмологии на основе рекуррентно-

- го підходу. // Геофиз. журн. – 1998. – №5. – С.96-98.
14. **Малицький Д. В.** Решение прямой двухмерной задачи теории распространения волн на основе рекуррентного подхода. // Геофиз. журн. – 1994. – № 4. – С. 62–65.
 15. **Malyskiy D.** Source parameters of small earthquakes. // XXVI General Assembly EGS, Nice, France – 2001.
 16. **Беликов В. П., Александров К. О., Рыжова Т. В.** Упругие свойства породообразующих минералов и горных пород – М.: Наука. – 1970. – 276 с.
 17. **Вербицкий Т. З.** Физическая природа нелинейной упругости геологических сред с фазовыми микронеоднородностями и особенности распространения в них упругих волн. // Геофиз. сб. АН УССР. – 1977. – Вып. 7. – С. 16–24.
 18. **Хекало П. І., Малицький Д. В.** Встановлення зв'язків між пружними параметрами сухої і насиченої рідиною породи. // Геофиз. журн. – 2005. – 27. – № 5. – С. 883–886.
 19. **Cheng C. H. and M. N. Toksoz.** Inversion of Seismic Velocities for the Pore Aspect Ratio Spectrum of a Rock. // J. Geophys. Res. – 1979. – 84. – P. 7533–7543.
 20. **Хекало П. І., Малицький Д. В.** Встановлення емпіричних залежностей між фізичними і колекторськими властивостями гірської породи. // Розвідка та розробка нафтових і газових родовищ. – Івано-Франківськ: Факел. – 2003. – № 4(9). – С. 64–67.

Надійшла до редакції 13.03.06

Шановні колеги!

З вересня 2006 року Державне підприємство по розповсюдженню періодичних видань "Преса" розпочинає передплатну кампанію на 2007 рік (I півріччя). Журнал "Наука та інновації" входить до Каталогу підприємства ДП "Преса". Передплату здійснюють усі відділення зв'язку.

Передплатний індекс:

- для індивідуальних передплатників – **91942**
(вартість передплати – **32,02 грн.**),
- для організацій і підприємств – **91943**
(вартість передплати – **62,02 грн.**).

Редакція журналу