

СЕЙСМОАКУСТИЧНА ДІАГНОСТИКА ПРОЦЕСІВ РУЙНУВАННЯ В ГЕОЛОГІЧНОМУ СЕРЕДОВИЩІ

© С.А. Вижва, Г.Т. Продайвода, Ю.А. Онанко, 2011

Київський національний університет імені Тараса Шевченка, Київ, Україна

Geophysical diagnostics is carried out by nonlinear multicomponent fluid-saturated crack model with the interstitial pressure; stress condition and temperature are taken into account. The optimization problem of reservoir engineering can be effectively solved by the means of geophysical monitoring just on the basis of reservoir condition diagnostics and detection of compressive and tensile stress zones.

Keywords: stress, deformation, cracks, pores, destruction, collector, monitoring of the oil-fields.

Вступ. Сучасну геофізику широко залучають до вирішення завдань моніторингу небезпечних природних і природно-техногенних катастроф. Проте традиційні підходи до вирішення цих завдань не дають належних результатів. Аналіз причин неефективності методик сучасного прогнозу землетрусів свідчить про відсутність реалістичних уявлень про перебіг фізичних процесів у вогнищі землетрусу, зокрема, на етапі підготовки сейсмічної події [6, 8, 12, 18, 20, 24].

Вивчення напруженого стану геологічного середовища з метою прогнозу сейсмічної активності доцільно здійснювати спільно із вивченням фізичних процесів у вогнищі землетрусу, оскільки ці явища циклічно взаємопов'язані [8, 12, 20]. Землетруси спричиняють порушення (руйнування) суцільності середовища, яке може відбуватися за двома сценаріями: активізація давніх розломів і тріщин, які вже існують у геологічному середовищі, та виникнення нових розривів і сколів. Для землетрусів високого і середнього рівня магнітуд загальноприйнятою є модель крихкого руйнування геологічного середовища [8, 12]. За даними статті [12], перед сильними землетрусами різко знижується рівень всебічного тиску, що вказує на зменшення міцнісних характеристик геологічного середовища.

Вплив небезпечних геологічних і техногенних процесів на реальне геологічне середовище призводить до розсіяного руйнування, яке, в свою чергу, зумовлює деградацію деформаційних властивостей та зменшення ефективних пружних властивостей, зміну структури тріщинно-порового простору і, відповідно, фільтраційних властивостей та порового тиску [3, 4, 6, 9, 10, 11, 20]. Характерною особливістю механічної поведінки геологічного середовища є можливість накопичення механічних пошкоджень навіть за малих квазістатичних навантажень і не лише під дією напружень зсуву, а й за

розтягу і стиску [6, 9, 10, 13]. Генерація тріщин неминуче супроводжується поглинанням енергії внаслідок росту тріщин і відповідної зміни структури геологічного середовища в околі берегів тріщин. В умовах фрагментації і роздрібнення геологічного середовища на процес його руйнування накладаються пластичні деформації, які пов'язані із тертям сформованих фрагментів. Цей процес супроводжується інтенсивною трансформацією пружної енергії в тепло [6, 13].

Моніторинг нафтових родовищ свідчить, що на початку їх експлуатації колектори, як правило, мають поровий тип пустотного простору і їхні фільтраційно-ємнісні властивості зумовлені міжзерновими порами. Під час розробки покладів нафти внаслідок впливу різних технологічних процесів, пов'язаних із видобуванням нафти, нагнітанням у пласт води як агента, що витісняє, а також цілеспрямованого гідророзриву пласта з метою підвищення дебітів свердловин, початково поровий колектор унаслідок техногенної тріщинуватості на окремих ділянках покладів набуває властивостей порово-тріщинного колектору [3, 22].

Формування техногенної тріщинуватості спричинюється інтенсивним відбором нафти і утворенням ділянок зі зниженим пластовим тиском, а також інтенсивним нагнітанням води в пласт і утворенням ділянок підвищених пластових тисків. Підвищені градієнти пластового тиску в процесі розробки покладів нафти зумовлюють формування техногенних тріщин (дилатансія – в зоні відбору, гідророзрив – у зоні нагнітання). Поєднання природних і техногенних факторів суттєво ускладнює процеси регулювання розробки покладів нафти, знижує ефективність самої розробки і, в кінцевому підсумку, призводить до зменшення коефіцієнта нафтовіддачі. У зв'язку з цим ефективний розв'язок задачі оптимізації технології розробки покладів нафти на

основі геофізичного моніторингу можливий лише за діагностики напруженого стану продуктивних покладів та виявлення ділянок і зон підвищених (зони стиснення) і знижених (зони розтягнення і розушільнення) напружень. При цьому інтерпретаційні моделі моніторингу природних і техногенних процесів для реєстрації геофізичних параметрів мають забезпечувати надійний контроль процесів генерації і росту тріщин та порових напружень – зсуву, розтягнення і стиснення, які залежать від порового тиску, за перевищення якого починаються розсіяне руйнування, накопичення механічних дефектів та відповідна деградація механічних властивостей, зміна структури тріщинно-порового простору і фільтраційних властивостей породи-колектору. Розвиток під час накопичення механічних пошкоджень незворотної об'ємної деформації, яка залежно від напруженого стану може бути додатною (дилатансія або розушільнення) або від'ємною (ушільнення або компакція), призводить до руйнування гірських порід [6, 9, 13, 25].

Теоретичні й експериментальні сейсмоакустичні методи дослідження напруженого стану гірських порід відомі давно [19, 21] і успішно застосовуються в гірничій [5] та інженерній геофізиці [21]. Разом з тим досі не розв'язано низку проблем, зумовлених впливом напруженого, термопружного внутрішньопорового тиску на сейсмоакустичні властивості. У цій статті запропонована нова дискретна нелінійна багатокомпонентна флюїдонасичена тріщинно-порова модель із внутрішньопоровим тиском, на яку діють складний напружений стан і температура. Ефективні лінійні і нелінійні термопружні властивості цієї моделі розраховані методами механіки стохастичного середовища [3, 13, 15, 16, 17], що забезпечує контроль умов локального механізму руйнування і врахування анізотропії пружних характеристик геологічного середовища сейсмоакустичними методами.

Теорія методу. Розглянемо репрезентативний об'єм у деякій відліковій конфігурації багатокомпонентного флюїдонасиченого тріщинно-порового геологічного середовища із початковим тиском у тріщинах і порах, на яке впливають високі температури. Початковий тиск рідини у тріщинах і порах (до взаємодії із пружним скелетом) за нормальної температури позначимо P_0 , а початкові напруження у твердому скелеті вважатимемо відсутніми. Нехай пружні характеристики цього елемента об'єму є випадковими, статистично однорідними функціями координат відлікової конфігурації. Випадкові поля напружень Кіргофа t_{ij} і градієнтів переміщень H_{ij} уявлятимемо ергодичними відносно операції осереднення за макроскопічним репрезентативним об'ємом [23].

Фізичні співвідношення нелінійної теорії пружності запишемо в декартових координатах відлікової конфігурації:

$$t_{ij}^{(1)} = C_{ijkl} e_{kl}^{(1)} - \beta_{ij} \theta - \xi_{ij}, \quad (1)$$

$$t_{ij}^{(2)} = C_{ijkl} \varepsilon_{kl}^{(2)} + C_{ijkl} e_{kl}^{(1)} H_{jm}^{(1)} + L_{ijklpq} (e_{kl} e_{pq})^{(1)},$$

$$\text{де } e_{ij}^{(1)} = \frac{1}{2}(H_{ij} + H_{ji}); \varepsilon_{ij}^{(2)} = e_{ij}^{(2)} + \frac{1}{2}(H_{mi} H_{nj})^{(1)}; \beta_{ij} = C_{ijkl} \alpha_{kl};$$

$\xi_{ij} = P_0 \delta_{ij}$; C_{ijkl} – тензор пружних сталей другого порядку; β_{ij} – тензор термопружних напружень; α_{kl} – тензор лінійного термічного розширення; θ – приріст температури, зумовлений зовнішнім нагріванням; ξ_{ij} – тензор початкових напружень у флюїді, що заповнює тріщини і пори і приймає значення P_0 ; L_{ijklpq} – тензор пружних сталей третього порядку. Верхній індекс у круглих дужках вказує порядок нелінійного наближення.

Для лінійного наближення першого порядку стохастичне рівняння рівноваги і граничні умови можна записати у символічній формі [13, 16, 17]:

$$\nabla C^0 \nabla \tilde{U} = -\nabla \tilde{\sigma}; \tilde{U} = 0; \mathbf{x} \in S; \quad (2)$$

де $\tilde{\sigma} = \tilde{C} e^{(1)} - \beta \theta - \xi 1$; $\tilde{C} = C(\mathbf{x}) - C^0$; $\tilde{U} = U(\mathbf{x}) - \langle U \rangle$; 1 – одиничний тензор другого рангу; ∇ – диференціальний оператор; C^0 – тензор пружних сталей другого порядку тіла порівняння; \tilde{C} – флюктуаційна складова тензора пружних сталей другого порядку; $\langle U \rangle$, \tilde{U} – математичне співвідношення і флюктуаційна складова вектора пружних зміщень; S – поверхня, що охоплює репрезентативний макроскопічний об'єм геологічного середовища.

Тензорну функцію Гріна $G_{kq}(\mathbf{x})$ системи рівнянь (2) знаходимо із умови

$$C^0_{ijkl} G_{kq,li}(\mathbf{x}) = \delta(\mathbf{x}) \delta_{qj}, \quad (3)$$

де $\delta(\mathbf{x})$ – дельта-функція Дірака. Користуючись методикою, яка викладена у публікаціях [16, 23], визначимо залежність між середніми деформаціями у тріщинах і порах сфероїдальної форми, що орієнтовані в n -му напрямку $\langle e^{in} \rangle$, і середніми деформаціями матриці-скелета $\langle e^m \rangle$ та середніми макроскопічними деформаціями репрезентативного макроскопічного об'єму $\langle e \rangle$:

$$\langle e^{in} \rangle = \langle e \rangle + C^{(m)} Z_n d_i \langle e^{(m)} \rangle - C^{(m)} Z_n d_{\beta i} - C^{(m)} Z_n d_{\rho i}, \quad (4)$$

де $d_i = C_i - C_m$; $d_{\beta i} = \beta_i - \beta_m$; $d_{\rho i} = P_i - P_m$; C_i , β_i , P_i – відповідно пружні сталі, термопружні напруження, тиск флюїду в i -му сфероїдальному включенні; C_m , β_m , P_m – відповідно пружні сталі, термопружні напруження, початкові напруження в матриці. Тут алгебричні компоненти тензору Z_n знаходимо із співвідношення [17, 23]

$$Z_n = (I - G f^{(i)})^{-1} G, \quad f^{(i)} = C^{(i)} - C^0. \quad (5)$$

Після осереднення (4) за усіма можливими орієнтаціями включень обчислюємо ефективні

пружні сталі другого порядку G^* , ефективні коефіцієнти термопружних напружень β^* та ефективного тиску у флюїді P^* , що заповнює тріщини і пори багатокомпонентного флюїдонасиченого тріщинно-порового геологічного середовища [17]:

$$C^* = \sum_{r=1}^{N+1} c_r C^{(r)} A_r, \quad (6)$$

$$\beta^* = \sum_{r=1}^{N+1} c_r (\beta_r - C^{(r)} \alpha_{A_r}), \quad (7)$$

$$P^* = \sum_{r=1}^{N+1} c_r (\xi_r - C^{(r)} P_{A_r}), \quad (8)$$

де алгебричні компоненти тензорів $A_r, A_m, \alpha_{A_r}, \alpha_{A_m}, P_{A_r}$ визначають за формулами [17]

$$A_r = A_m (I + \bar{Z}_r d_r), \quad (9)$$

$$A_m = \left(I + \sum_{r=1}^N c_r \bar{Z}_r d_r \right)^{-1}, \quad (10)$$

$$\alpha_{A_r} = r_{\beta} A_r - \bar{Z}_r d_{\beta}; \quad \alpha_{A_m} = r_{\beta} A_m, \quad (11)$$

$$r_A = \sum_{r=1}^N c_r \bar{Z}_r d_r; \quad r_{\beta} = \sum_{r=1}^N c_r \bar{Z}_r d_{\beta}, \quad (12)$$

$$P_{A_r} = A_r r_p - \bar{Z}_r d_{pr}; \quad P_{A_m} = A_m r_p, \quad (13)$$

$$r_p = \sum_{r=1}^N c_r \bar{Z}_r d_{pr}. \quad (14)$$

Для нелінійного розв'язку другого порядку стохастичне рівняння рівноваги репрезентативного об'єму і граничні умови для визначення статистичних флюктуацій другого порядку малості $\tilde{U}_{(2)}$ має такий вигляд [13, 23]:

$$\nabla C^0 \nabla \tilde{U}_{(2)} = -\nabla (\bar{\sigma}_{(2)} + \rho_L), \quad \tilde{U}_{(2)}(\mathbf{x}) = 0, \quad \mathbf{x} \in S, \quad (15)$$

де $\bar{\sigma}_{(2)} = \delta C e_{(2)}$; $\rho_L = L(e \otimes e)_{(1)}$. Диференційний оператор рівняння (15) збігається за формою з відповідним оператором рівняння (2), що дає змогу використовувати в подальшому тензорну функцію Гріна $G(\mathbf{x})$ лінійного розв'язку для визначення градієнтів переміщень другого наближення:

$$e_{(2)} = \Gamma \cdot \bar{\sigma}_{(2)} + \langle e_{(2)} \rangle, \quad (16)$$

де Γ – інтегральний оператор типу згортки, ядром якого є похідні від функції Гріна.

Користуючись методикою [13, 23], знаходимо ефективні сталі Ламе третього порядку для багатокомпонентного флюїдонасиченого тріщинно-порового геологічного середовища v_1^*, v_2^*, v_3^* :

$$v_1^* = \sum_{r=1}^{N+1} 3c_r \left\{ l_A \left[2\lambda K_A (3K + \mu)_A + n_A f_A \right] + 9v_1 K_A^3 + 6v_2 l_A K_A (3K + 2\mu)_A + 8v_3 l_A^2 n_A \right\}_r, \quad (17)$$

$$v_2^* = \sum_{r=1}^{N+1} c_r \left\{ 4\mu_A^2 \left[\frac{1}{2} f_A + 3v_2 K_A + 4v_3 l_A \right] - \frac{1}{2} (3\lambda K_A + 2\mu_A) \right\}_r, \quad (18)$$

$$v_3^* = \sum_{r=1}^{N+1} c_r \left[\frac{3}{2} \mu_A (4\mu_A^2 - 1) + 8v_3 \mu_A^3 \right], \quad (19)$$

де $f_A = (3\lambda K_A + 6\mu_A)_r$; K_A, m_A, l_A – алгебричні компоненти тензорів (9), (10); $v_{1(r)}, v_{2(r)}, v_{3(r)}$ – сталі Ламе третього порядку r -компонента.

Якщо у геологічному середовищі із початковим однорідним напруженням поширюється плоска монохроматична пружна хвиля, то, користуючись лінеаризованим співвідношенням пружності теорії скінченних початкових деформацій [7, 16], можна побудувати узагальнене рівняння Гріна–Крістоффеля:

$$(B_{mj} - \delta_{mj} \rho_0 v^*) \langle U_j \rangle = 0, \quad (20)$$

де

$$B_{mj} = C_{imj}^* \lambda_j \lambda_m \lambda_i \lambda_i n_i n_j + \delta_{im} \left[2v_1^* \varepsilon_{KK}^0 + 2(\varepsilon_{ii}^0 + \varepsilon_{jj}^0) \right] \times \\ \times \lambda_j^2 \lambda_m \lambda_i n_i n_j + \left[v_2^* \varepsilon_{KK}^0 + 2v_3^* (\varepsilon_{ij}^0 + \varepsilon_{mm}^0) \right] \times \\ \times \lambda_j^2 \lambda_m^2 n_j n_m + \left[v_2^* \varepsilon_{KK}^0 + 2v_3^* (\varepsilon_{ii}^0 + \varepsilon_{jj}^0) \right] \times \\ \times \lambda_j^2 \delta_{mj} \lambda_i^2 m_i^2 + \sigma_{ii}^* \delta_{mj} \lambda_i^2 n_i^2;$$

$\lambda_i = \sqrt{1 + 2\varepsilon_{ii}}$; n_i – компоненти одиничного вектора

хвильової нормалі; ρ_0 – ефективна густина геологічного середовища; v^* – ефективна фазова швидкість поширення пружної хвилі. Із розв'язку рівняння (20) випливає, що в будь-якому напрямку хвильової нормалі геологічного середовища розповсюджуються три фазові швидкості із ортогональними векторами поляризації [1, 2, 14].

Для оцінки значень мікронапружень, за яких відбувається руйнування геологічного середовища, необхідно знайти залежність середніх по компонентах напружень через макронапруження і температуру [23]:

$$c_1 \langle \sigma_{ij}^{(1)} \rangle = \left(S_{ijkl}^{(1)} - S_{ijkl}^{(2)} \right)^{-1} \times \\ \times \left[\left(S_{klpq}^* - S_{klpq}^{(2)} \right) \langle \sigma_{pq} \rangle + \left(\alpha_{kl}^* - \langle \alpha_{kl} \rangle \right) \theta \right]; \quad (21)$$

$$c_2 \langle \sigma_{ij}^{(2)} \rangle = \left(S_{ijkl}^{(2)} - S_{ijkl}^{(1)} \right)^{-1} \times \\ \times \left[\left(S_{klpq}^* - S_{klpq}^{(1)} \right) \langle \sigma_{pq} \rangle + \left(\alpha_{kl}^* - \langle \alpha_{kl} \rangle \right) \theta \right]; \quad (22)$$

де $S_{ijkl}^{(1)}, S_{ijkl}^{(2)}$ – пружні піддатливості компонент; S_{ijkl}^* – ефективні пружні піддатливості геологічного середовища. У подібний спосіб можна отримати вирази для середніх по компонентах деформацій [23].

Результати математичного моделювання. Проведені чисельні розрахунки акустопружних ефектів модулів плагіограніту із хаотично орієнтованими “дископодібними” мікротріщинами (щільність мікротріщин $\xi = 0,05$) в умовах різного просторового напруженого стану на глибині 15 км континентальної земної кори. Розглянуто три моделі:

- а) модель G-1, горизонтально стискувальні напруження однакові: $\sigma_1^0 = \sigma_2^0 = \frac{1}{2}(\sigma_1 + \sigma_2)$; вертикальна складова тензора напружень $\sigma_3^0 = P_{ST}$;
- б) модель G-2, горизонтально стискувальні напруження неоднакові: $\sigma_1^0 = \frac{3}{4}(\sigma_1 + \sigma_2)$; $\sigma_2^0 = \frac{1}{4}(\sigma_1 + \sigma_2)$; вертикальна складова тензора напружень $\sigma_3^0 = P_{ST}$;
- в) модель G-3, горизонтальне напруження розтягнення $\sigma_1^0 = -\frac{3}{4}(\sigma_1 + \sigma_2)$ більше, ніж горизонтальне напруження стиснення: $\sigma_2^0 = \frac{1}{4}(\sigma_1 + \sigma_2)$; $\sigma_3^0 = P_{ST}$.

Величини пружних сталей третього порядку твердого скелета плагіограніту були прийняті такими, ГПа: $a = -3,9$; $b = -0,01$; $c = -0,1$.

Чисельні результати математичного моделювання параметрів анізотропії об'ємних пружних хвиль моделей мікротріщинуватого плагіограніту для різних умов просторового напруженого стану земної кори показано на рис. 1–3.

Величина диференціального коефіцієнта пружної анізотропії (A_d) для довільного напрямку хвильової нормалі обчислена із співвідношення

$$A_d = \left[\frac{(B^2)_C - (B_m^2)_C}{(B_m^2)_C} \right]^{1/2} 100 \%, \quad (23)$$

де C – слід тензора B_{il} ;

$$(B^2)_C = B_{11}^2 + B_{22}^2 + B_{33}^2 + 2(B_{12}^2 + B_{13}^2 + B_{23}^2);$$

$$(B_m^2)_C = \frac{1}{2}[B_C^2 + 3\mathbf{n} \mathbf{B} \mathbf{n} + 2Bc \mathbf{n} \mathbf{B} \mathbf{n}];$$

$$B_C = B_{11} + B_{22} + B_{33};$$

$$\mathbf{n} \mathbf{B} \mathbf{n} = B_{11}n_1^2 + B_{22}n_2^2 + B_{33}n_3^2 + 2(B_{12}n_1n_2 + B_{13}n_1n_3 + B_{23}n_2n_3).$$

Симетрія стереопроєкцій характеристичної поверхні ізоїній однакових значень коефіцієнта анізотропії A_d залежить від типу об'ємного напруженого стану. Для моделі G-1 вона виявилася тетрагональною, незважаючи на те, що симет-

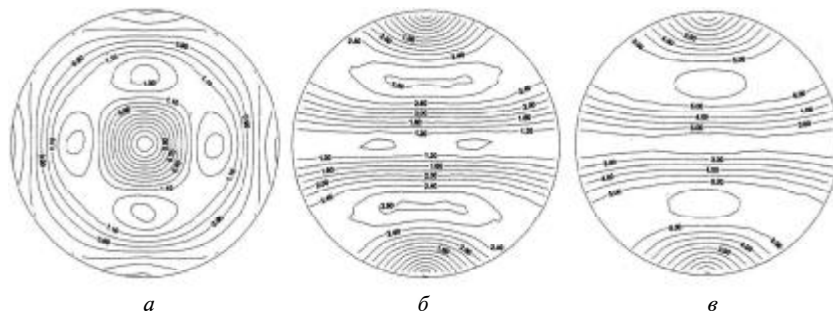


Рис. 1. Стереопроєкції ізоїній коефіцієнта диференціальної пружної анізотропії моделей плагіограніту для різних типів напруженого стану континентальної земної кори на глибині 15 км (ізоїнії – в %): а – модель G-1 ($-\sigma_1^0 = -\sigma_2^0 \neq -\sigma_3^0$); б – модель G-2 ($-\sigma_1^0 \neq -\sigma_2^0 \neq -\sigma_3^0$); в – модель G-3 ($-\sigma_1^0 \neq -\sigma_2^0 = -\sigma_3^0$)

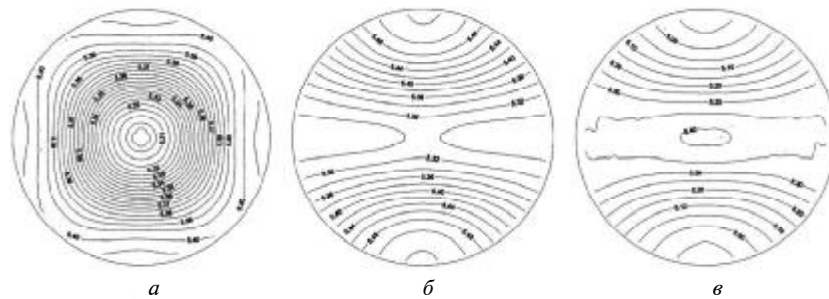


Рис. 2. Стереопроєкції ізоїній фазових швидкостей хвиль повздовжньої поляризації плагіограніту для різних типів напруженого стану континентальної земної кори на глибині 15 км (ізоїнії – в $\text{км} \cdot \text{с}^{-1}$). Умовні позначення див. на рис. 1

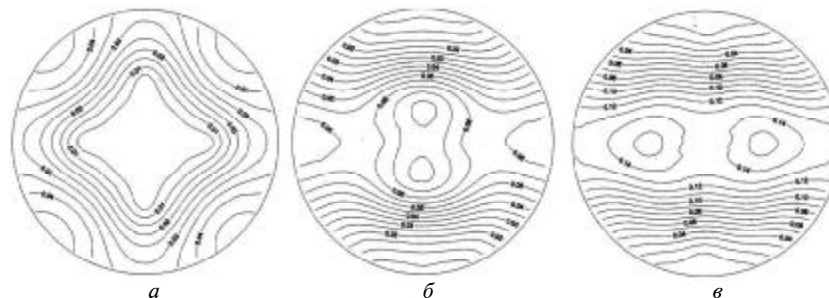


Рис. 3. Стереопроєкції ізоїній різниці між “швидкою” і “повільною” фазовими швидкостями поперечної поляризації плагіограніту для різних типів напруженого стану континентальної земної кори на глибині 15 км (ізоїнії – в $\text{км} \cdot \text{с}^{-1}$). Умовні позначення див. на рис. 1

рія тензора напружень поперечно-ізотропна ($\sigma_1^0 = \sigma_2^0 \neq \sigma_3^0$). У випадку об'ємного складно-напруженого стану ($\sigma_1^0 \neq \sigma_2^0 \neq \sigma_3^0$) симетрія характеристичних поверхонь ізоліній параметрів виявилась ромбічною, тобто збігається із симетрією тензора напружень. Для параметрів анізотропії пружних хвиль моделей мікротріщинуватого граніту, які індуковані напруженим станом, характерні певні закономірності в просторовому розташуванні їх локальних екстремальних значень та положенні повздожніх акустичних нормалей та акустичних осей.

Збільшення анізотропії напруженого стану, тобто девіаторних напружень, призводить до збільшення коефіцієнта пружної анізотропії, максималні значення якого для моделей плагіограніту зростають від 1,3 до 5,5 % (див. рис. 1).

Екстремальні значення фазових швидкостей повздожньої поляризації колінарні напрямкам дії головних напружень (див. рис. 2). Інтенсивність явища розщеплення хвиль поперечної поляризації також залежить від інтенсивності максимальних напружень зсуву. Причому для моделі G-1 максимальні значення різниці між "швидкою" і "повільною" квазіпоперечними хвилями колінарні площині, в якій діють максимальні напруження зсуву. Існує чотири акустичні осі, які також лежать у площині, в якій діють ці напруження. За зміни напруженого стану змінюються і характеристичні поверхні стереопроєкцій ізоліній фазових швидкостей повздожньої поляризації (рис. 2). Для моделі G-2 максимальне значення для квазіповздожніх хвиль збігається із напрямком дії максимальних стискувальних напружень (рис. 2, б). У напрямку дії максимальних напружень розтягання моделі G-3 (рис. 2, в), навпаки, спостерігається найменша фазова швидкість поширення хвилі повздожньої поляризації.

Інтенсивність розщеплення поперечних хвиль найбільша у площині дії стискувальних напружень у напрямку їх максимальних величин (див. рис. 3, б, в).

Одержані кількісні оцінки коефіцієнтів пружної анізотропії можна розглядати як мінімально можливі, оскільки під час моделювання не брали до уваги процеси закриття і розкриття мікротріщин залежно від їх орієнтації до напрямку дії головних напружень та можливість генерації нових мікротріщин в умовах дії термонапружень.

Таким чином, теоретично доведено існування акустопружних ефектів у геологічному середовищі із початковими напруженнями.

Одержані чисельні результати добре узгоджуються з даними експериментів і засвідчують існування інтенсивних акустопружних ефектів під дією напруженого стану в тріщинуватих гірських породах. Встановлені такі акустопружні ефекти,

які ініціюються напруженим станом в ізотропному геологічному середовищі:

- азимутальна залежність фазових і променевих швидкостей поширення хвиль повздожньої і поперечної поляризації, тобто анізотропія швидкостей пружних хвиль;
- відхилення векторів пружних переміщень і векторів променевої швидкості поширення хвиль повздожньої і поперечної поляризації від напрямку хвильової нормалі; наявність різниці між фазовими і променевими швидкостями;
- розщеплення хвиль поперечної поляризації.

Висновки. Розроблено новий теоретичний підхід до аналізу напружено-деформованого стану реального геологічного середовища за результатами сейсмоакустичних досліджень, в основі якого лежить модель дискретного нелінійного багатокомпонентного флюїдонасиченого тріщинно-порового геологічного середовища і з початковим поровим тиском. Ефективні термопружні властивості такої моделі розраховують сучасними методами механіки стохастичного середовища.

Завдяки оцінкам мікронапружень і деформацій в компонентах можна здійснювати прогноз залежності фазових швидкостей геологічного середовища за зміни напруженого стану, температури і порового тиску. Крім того, відкриваються широкі можливості для прогнозу міцності і напруженого стану за допомогою сейсмоакустичних методів. Визначення сейсмоакустичними методами тріщинно-порових зон становить значний інтерес під час пошуків та розвідки нафти і газу в кристалічних породах.

1. *Александров К.С., Продайвода Г.Т.* Анизотропия упругих свойств минералов и горных пород. – Новосибирск: Изд-во СО РАН, 2000. – 354 с.
2. *Бакулин В.Н., Троян В.Н.* Акустопругость горных пород. – СПб: Изд-во С-Петербур. ун-та, 2000. – 316 с.
3. *Вишва С.А.* Геофізичний моніторинг небезпечних геологічних процесів. – К.: Обрії, 2004. – 236 с.
4. *Вишва С.А., Маслов Б.П., Продайвода Г.Т.* Эффективные упругие свойства нелинейных многокомпонентных геологических сред // Геофиз. журн. – 2005. – 27, № 6. – С. 1012–1022.
5. *Глушков В.Т., Ямищев В.С., Яланский А.А.* Геофизический контроль в угольных шахтах. – Киев: Наук. думка, 1978. – 224 с.
6. *Гольдин С.В.* Дилатансия, переупаковка и землетрясения // Физика Земли. – 2004. – № 10. – С. 37–54.
7. *Гузь А.Н., Махорт Ф.Г., Гуца О.И.* Введение в акустопругость. – Киев: Наук. думка, 1977. – 150 с.
8. *Добровольский И.П.* Теория подготовки тектонического землетрясения. – М., 1991. – 217 с.
9. *Извеков О.Я., Кондауров В.И.* Модель пористой среды с упругим трещиноватым скелетом // Физика Земли. – 2009. – № 4. – С. 31–42.
10. *Каракин А.В.* Общая теория компакций при малой пористости // Там же. – 1999. – № 12. – С. 13–26.

11. *Лебедев А.В., Назаров В.Е.* Нелинейная упругость трещиноватых сред и диагностика напряженного состояния горных пород // *Физика Земли*. – 2000. – № 4. – С. 50–60.
12. *Лукьянов И.В.* Возможность мониторинга напряженного состояния геосреды на примере региона о. Новая Ирландия // *Геофиз. исследования*. – 2009. – **10**, № 1. – С. 64–76.
13. *Маслов Б.П., Продайвода Г.Т., Выжва С.А.* Новый метод математического моделирования процессов разрушения в литосфере // *Геоинформатика*. – 2006. – № 3. – С. 53–61.
14. *Продайвода Г.Т.* Основы сейсмоакустики. – К.: ВПЦ “Київ. ун-т”, 2001. – 296 с.
15. *Продайвода Г.Т., Выжва С.А.* Математичне моделювання геофізичних параметрів. – К.: ВПЦ “Київ. ун-т”, 1999. – 112 с.
16. *Продайвода Г.Т., Маслов Б.П., Выжва С.А.* Акустоупругие эффекты в микротрещиноватой геологической среде // *Геофиз. журн.* – 2001. – **23**, № 5. – С. 92–100.
17. *Продайвода Г.Т.* Математичне моделювання ефективних термопружних властивостей багатоконпонентного тріщинуватого геологічного середовища, насиченого флюїдом з внутрішнім тиском // *Там само*. – 2007. – **27**, № 3. – С. 122–130.
18. *Ребецкий Ю.Л.* Тектонические напряжения и прочность природных массивов. – М.: Академкнига, 2007. – 406 с.
19. *Ризниченко Ю.В., Виноградов С.Д., Мячкин В.И. и др.* Исследования горного давления геофизическими методами. – М.: Наука, 1968. – 215 с.
20. *Родкин М.В.* Проблемы физики очага землетрясения: противоречия и модели // *Физика Земли*. – 2001. – № 8. – С. 42–52.
21. *Савич А.И., Контев В.И.* Изучение напряженного состояния пород сейсмоакустическими методами // *Физика Земли*. – 1991. – № 9. – С. 60–72.
22. *Скрылев С.А., Митрофанов А.Д., Бодрягин А.В. и др.* Прогноз напряженного состояния пород пласта AB_1^{1-2} “Рябчик” Самотлорского месторождения по данным ГИС // *Геология, геофизика и разработка нефт. и газ. м-ний*. – 2009. – № 7. – С. 30–33.
23. *Хорошун А.П., Маслов Б.П.* Нелинейные свойства композитных материалов стохастической структуры. – Киев: Наук. думка, 1993. – 132 с.
24. *Hardebeck J.L., Hauksson E.* Crustal stress field in Southern California and its implications for fault mechanism // *J. Geophys. Res.* – 2001. – **106**, B. 10. – P. 21859–21882.
25. *Shimizu N.* The Effect of Cracks on Compressional Wave Velocity and its Anisotropy in Calcareous Rocks // *J. Fac. Sci., Hokkaido Univ. Ser VII (Geophysics)*. – 1984. – **7**, № 4. – P. 339–399.

Надійшла до редакції 09.08.2010 р.

С.А. Выжва, Г.Т. Продайвода, Ю.А. Онанко

СЕЙСМОАКУСТИЧНА ДІАГНОСТИКА ПРОЦЕСІВ РУЙНУВАННЯ В ГЕОЛОГІЧНОМУ СЕРЕДОВИЩІ

Геофізичну діагностику здійснюють за допомогою нелінійної багатоконпонентної флюїдонасиченої тріщинної моделі із внутрішньопоровим тиском з урахуванням напруженого стану і температури. Ефективний розв’язок задачі оптимізації технології розробки покладів нафти за геофізичним моніторингом можливий лише на основі діагностики напруженого стану продуктивних покладів та виявлення ділянок і зон підвищених (зони стискання) і знижених (зони розтягнення) напружень.

Ключові слова: напруження, деформація, тріщини, пори, руйнування, колектор, моніторинг нафтових родовищ.

С.А. Выжва, Г.Т. Продайвода, Ю.А. Онанко

СЕЙСМОАКУСТИЧЕСКАЯ ДИАГНОСТИКА ПРОЦЕССОВ РАЗРУШЕНИЯ В ГЕОЛОГИЧЕСКОЙ СРЕДЕ

Геофизическая диагностика осуществляется с помощью нелинейной многокомпонентной флюидонасыщенной трещинной модели при внутривпоровом давлении и учете напряженного состояния и температуры. Эффективное решение задачи оптимизации технологии разработки залежей нефти путем геофизического мониторинга возможно лишь на основе диагностики напряженного состояния продуктивных залежей и выявления участков и зон повышенных (зоны сжатия) и пониженных (зоны растяжения) напряжений.

Ключевые слова: напряжения, деформация, трещины, поры, разрушение, коллектор, мониторинг нефтяных месторождений.