

УДК 550.834

І.М. Безродна, пров. інж.

МАТЕМАТИЧНЕ МОДЕЛЮВАННЯ ЕФЕКТИВНИХ ПРУЖНИХ І АКУСТИЧНИХ ПАРАМЕТРІВ СКЛАДНОПОБУДОВАНИХ КАРБОНАТНИХ ПОРІД-КОЛЕКТОРІВ

Досліджені моделі складнопобудованих карбонатних порід-колекторів із різною структурою пустотного простору: отримані їх пружні постійні, вивчені орієнтація та пружна симетрія швидкостей розповсюдження пружних хвиль та інтегральної анізотропії, побудовані стереопроєкції вказівних поверхонь параметрів анізотропії для вказаних моделей колекторів, що може бути використано як попереднє наближення при вивченні фільтраційно-ємнісних властивостей реальних складнопобудованих карбонатних порід-колекторів за даними ГДС та при петроакустичних дослідженнях.

The models of composite carbonate rocks-reservoirs with different empty space structure are investigated. Their elastic constants are obtained, orientation and elastic symmetry of elastic waves velocities distribution and integral anisotropy is studied, the stereoprojections for indicator surfaces of anisotropy parameters for the mentioned reservoir models are created. They could be used as first approximation in studying of filter-capacitive properties of the real composite carbonate rocks-reservoirs by the logging data and in petroacoustic investigations.

Об'єктом наукового дослідження в роботі є геологічне середовище, формування якого відбувалося протягом значного геологічного часу під впливом різних тектонічних, осадових і деформаційних процесів. Ці процеси протікали нерівномірно в просторі і часі, внаслідок чого сформувалося неоднорідне геологічне середовище із багатозонним анізотропним скелетом та різноманітним пустотним простором, тріщини, каверни та пори якого орієнтовані згідно накладеним напругам при утворенні чи зміні порід. Пустоти можуть бути заповнені газом, або флюїдами. Кожен із цих компонентів характеризується своїми фізичними властивостями і різнобічними зв'язками з іншими компонентами.

Теоретичні дослідження моделей складнопобудованих порід-колекторів можливі лише при застосуванні більш досконалих акустичних моделей, які б адекватно відображали їх властивості і структуру, а також деформаційні процеси, що в них відбуваються. Для кількісної оцінки впливу пустотного простору і напруженого стану на ефективні пружні постійні і акустичні властивості нетрадиційних порід-колекторів застосовуються методи теорії механіки стохастичного середовища [1,2].

Структура реального геологічного середовища визначається сукупністю різноманітних структурних елементів. Такими структурними елементами на структурному рівні текстур гірських порід є зерна мінералів, мікротріщини і пустоти (сухі і флюїдонасичені), а на рівні геоформації – мікро- і макротріщинуватість, лінзи, шари, пачки шарів і т. ін. Загальною рисою майже усіх нетрадиційних резервуарів нафти та газу є те, що їх породи-колектори мають відносно невелику пористість, а фільтраційні властивості визначаються мікро- та макротріщинами та кавернами.

Для визначення пружних параметрів реального геологічного середовища будують різні моделі, які більшою чи меншою мірою відображають його структурну неоднорідність і характер взаємодії між його структурними елементами. Зрозуміло, що при цьому можлива неадекватність між спрощеними уявленнями, на яких будується модель і реальним геологічним середовищем.

Універсальних моделей, що відображають все різноманіття неоднорідностей і їх взаємодії в геологічному середовищі не існує, як не існує універсальних методів їх математичного моделювання [3].

Об'єктом дослідження в роботі є складнопобудований карбонатний колектор як багатоконпонентне анізотропне тріщинувате геологічне середовище із пружно-анізотропними включеннями у вигляді сфероїдів обертання, що орієнтовані по представницькому об'єму як вздовж окремих локалізованих напрямків, так і згідно заданої довільної функції розподілу орієнтації включень.

Обґрунтування моделі карбонатного колектора

Математична модель колектора представляє собою [3] жорстку матрицю, яка пронизана різними за формою, розмірами та орієнтацією сфероїдами обертання з різними форматами $\alpha = a/c$ (де a та c – півосі сфероїда обертання), що заповнені флюїдом чи газом.

Як відомо з літературних та фондових даних, структуру пустотного простору порід досліджували вчені прямими методами та методами математичного моделювання.

В роботах Saito Tokumi, Abe Mamoru Burns D.R., Cheng C.H., Wilkens R.H., Timur A., Hemphkins W.B., Weinbrand R.M., Куровця І.М., Лукіна А.Є. та інш. наводяться результати практичних досліджень спектрів пор гранітів і пісковиків та на основі теорії композитних матеріалів розроблено 3640 моделей кристалічних вапняків.

В роботі [4] зазначено, що сутність системного аналізу тріщинуватості порід полягає в поєднанні морфогенетичної типізації тріщин, визначення просторової орієнтації тріщин; виділення певних систем тріщинуватості; розробки критеріїв спостереження тріщинуватих зон. В роботі важлива увага приділяється флюїдодинамічній тріщинуватості вторинного походження та колекторам із такою пористістю.

В роботі [5] автори розробили 3640 математичних моделей розподілення форми пустот в кристалічному вапняку та провели співставлення розрахункових значень швидкості повздовжньої хвилі, що отримані за рівняннями Кустера із результатами практичних вимірів в 15 видах кристалічного вапняку.

У всіх зразках в залежності від діаметра зерен спостерігається тенденція до зміни форматів пор і тріщин. Для крупнозернистих вапняків характерний розподіл невеликої кількості пор із сіткоподібним розтріскуванням із форматами порядку $\alpha = 10^{-4} - 10^{-5}$ а для дрібнозернистих – формат пустот $\alpha = 10^{-2} - 10^{-3}$. Загалом, авторами роботи встановлено, що для кристалічних вапняків характерні формати пустот від 10^0 до 10^{-5} .

На основі досліджень під мікроскопом, а також досліджень структури розподілення форма пор було прийнято авторами у вигляді спектру: $10^0, 3,162 \cdot 10^{-1}, 10^{-1}, 3,162 \cdot 10^{-2}, 10^{-2}, 3,162 \cdot 10^{-3}, 10^{-3}, 3,162 \cdot 10^{-4}, 10^{-4}, 3,162 \cdot 10^{-5}, 10^{-5}$.

В роботі [6] розглядаються результати досліджень гранульованих вапняків різних типів пористості. Виділяються 2 головних типи пустот: міжгранулярні та інгранулярні. Дослідження їх проводилося у дві стадії: аналізувалися зображення шліфів під оптичним мікроскопом та зображення аншліфів за допомогою скануючого електронного мікроскопу. В результаті визначено, що формат пустот за даними електронної мікроскопії міжгранулярних пор складає від 10^{-2} м до 10^{-3} м, а інгранулярних відповідно від 10^{-3} м до 10^{-4} м.

Таким чином, за літературними даними дослідження шліфів та знімків пустотного простору під електронним та поляризаційним мікроскопом встановлено, що всі пустоти в гірських породах можна описати сфероїдами із значеннями величини формату α від 10^{-4} до 10^3 . При цьому ізометричним і сфероїдальним порам відповідають пустоти з форматом 10^0-10^{-1} , перехідним пустотам і мікротріщинам – $10^{-1}-10^{-2}$, мікротріщинам – $10^{-2}-10^{-4}$, кавернам – 10^0-10^3 . Генетично ізометричні пустоти, в основному, представлені міжзерновими порами, а пе-

рехідні – тріщинами між окремими кристалами і тріщинами в цементі; мікротріщинам відповідають міжкристалічні тріщини, внутрішньокристалічні тріщини; голкоподібні пустоти ($\alpha > 1$) відповідають стилолітам та кавернам вилугування.

На рисунку 1 наведені основні узагальнені характеристики спектрів пустот за класифікацією структури пустотного простору для різних типів карбонатних порід-колекторів, що прийняті в промисловій геофізиці.

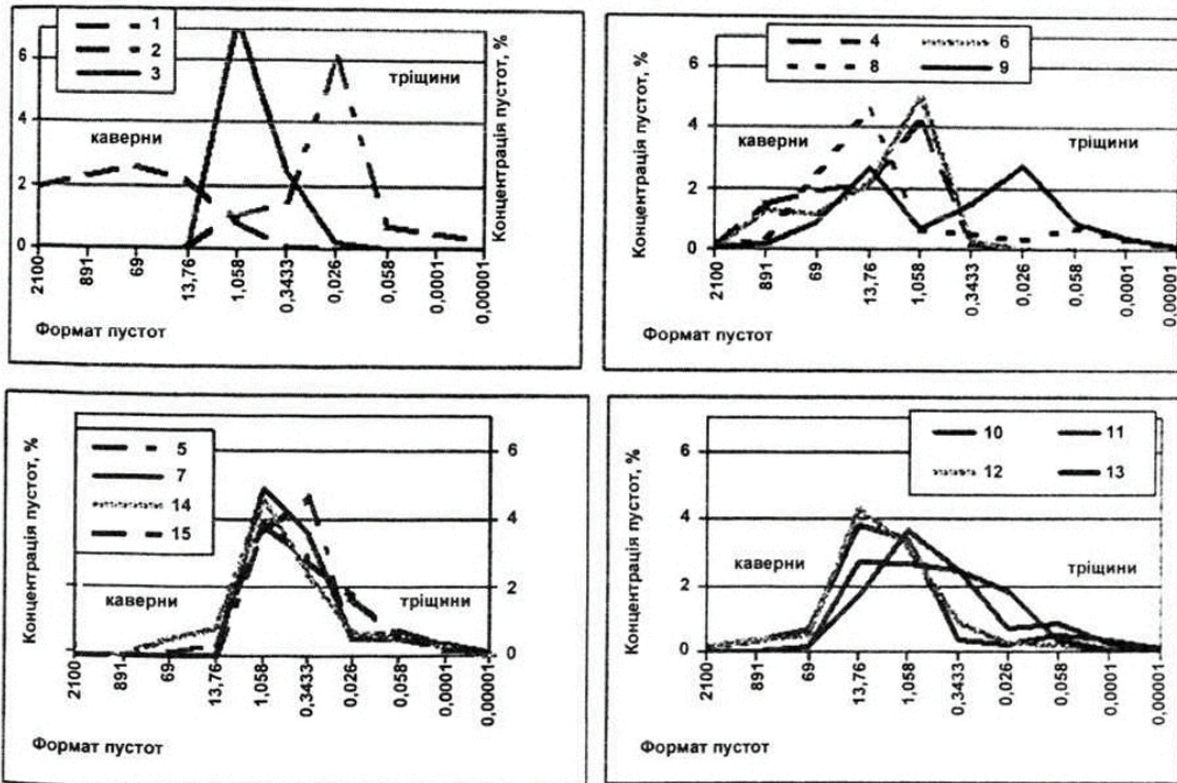


Рис. 1. Структури пустотного простору моделей вапняків різних типів
 а) 1 – тріщинного, 2 – кавернозного, 3 – гранулярного; б) 4 – гранулярно-кавернозного, 6 – кавернозно-гранулярного, 8 – тріщинно-кавернозного, 9 – кавернозно-тріщинного; в) 5 – гранулярно-тріщинного, 7 – тріщинно-гранулярного, 14 – кавернозно-тріщинно-гранулярного, 15 – кавернозно-гранулярно-тріщинного; г) 10 – гранулярно-тріщинно-кавернозного, 11 – гранулярно-кавернозно-тріщинного, 12 – тріщинно-гранулярно-кавернозного, 13 – тріщинно-кавернозно-гранулярного

Результати чисельного моделювання

В роботі розглядаються результати чисельного моделювання ефективних пружних постійних для вивчених моделей карбонатних порід-колекторів різного типу та впливу структури пустотного простору порід на властивості таких колекторів. Для моделювання прийнята порово-кавернозно-тріщинна модель карбонатної породи-колектора, яка характеризується невеликою анізотропністю, має однорідну матрицю, пустотний простір насичений мінералізованою водою, де пустоти розташовані хаотично.

Обернена задача сейсмоакустики вирішується шляхом побудови такої теоретичної моделі розповсюдження пружних коливань в геологічному середовищі, що не суперечить спостереженим даним геофізичних методів. Основними властивостями моделі є фазові швидкості розповсюдження пружних хвиль повздовжньої v_p та поперечної v_s поляризації, а також ефективна густина середовища.

Інверсія даних здійснюється відомим методом найменших квадратів (МНК) з використанням методів нелінійної оптимізації. Оцінюється квадратична функція відхилень значень спостережених фазових швидкостей від значень теоретичної моделі.

$$f = \sum_{i=1}^N (v_i^{(експ)} - v_i^{(теор)})^2, \quad (1)$$

де N – кількість фактичних спостережень.

Теоретична модель розповсюдження фазових пружних хвиль описується характеристичним рівнянням Гріна-Крістофеля

$$(\Gamma_{ij} - \rho \cdot v^2 \delta_{ij}) u_j = 0,$$

де $\Gamma_{ij} = C_{ijkl} n_j n_k$ – тензор Гріна-Крістофеля, де C_{ijkl} – ефективний тензор пружних постійних середовища, ρ – його ефективна густина, u_j – компоненти вектору

пружних зміщень, δ_{ij} – дельта Кронекера, n_k – компоненти вектору хвильової нормалі.

Таким чином задача зводиться до обчислення компонент ефективного тензора пружних постійних та ефективного густини. Поняття ефективний підкреслює визначення параметру з врахуванням дії зовнішніх сил, таких як тиск та температура, та ефектів, що вони викликають в середовищі.

Алгоритм забезпечує обчислення параметрів акустичного тензора, коефіцієнтів диференціальної й інтегральної пружної анізотропії. Суттєвою особливістю алгоритму є можливість розрахунку цілого набору параметрів анізотропії пружних хвиль: індикатрис фазових швидкостей, кутів відхилення векторів пружних зміщень від вектора хвильової нормалі, кутів відхилення векторів променевої швидкості від хвильової нормалі.

Для обчислення величин кута відхилення вектору пружних зміщень від напрямку хвильової нормалі можна скористатися співвідношенням:

$$\cos \phi = n_i < u_i > \quad (2)$$

Якщо відома фазова швидкість v і вектор пружних зміщень u , то компоненти вектору променевої швидкості $v_j(e)$ можна знайти із співвідношення:

$$< v_j(e) > = \frac{C_{ijk} u_i n_k}{\rho v} \quad (3)$$

де ρ – щільність.

Для кількісної оцінки пружної анізотропії використовується диференціальний A_d коефіцієнт пружної анізотропії, величина якого характеризує відхилення пружних властивостей заданого пружного анізотропного середовища від найближчого до нього ізотропного середовища для довільного напрямку хвильової нормалі. Диференціальний коефіцієнт пружної анізотропії обчислюється по формулі:

$$A_d = \sqrt{\frac{(\Lambda^2)_c - (\Lambda_m^2)_c}{(\Lambda_m^2)_c}} \times 100\% \quad (4)$$

де

$$\begin{aligned} (\Lambda^2)_c &= < \Lambda_{11} >^2 + < \Lambda_{22} >^2 + < \Lambda_{33} >^2 + \\ &+ 2(< \Lambda_{12} >^2 + < \Lambda_{13} >^2 + < \Lambda_{23} >^2) \\ (\Lambda_m^2)_c &= < \Lambda_{m11} >^2 + < \Lambda_{m22} >^2 + < \Lambda_{m33} >^2 + \\ &+ 2(< \Lambda_{m12} >^2 + < \Lambda_{m13} >^2 + < \Lambda_{m23} >^2) \\ < \Lambda >_c &= < \Lambda_{11} > + < \Lambda_{22} > + < \Lambda_{33} > \end{aligned}$$

Для класифікації текстур на аксіальні і планальні типи використовувалась характеристична поверхня акустичного тензора μ_{ij} [7]. Компоненти цього тензора визначалися шляхом згортки тензора ефективних пружних постійних C_{ijkl} :

$$\rho \dot{\mu}_{ij} = C_{ijpp} \quad (5)$$

де ρ – густина.

Оскільки тензор μ_{ij} – додатньо визначений симетричний тензор другого рангу, то його характеристична поверхня є еліпсоїд. Якщо відомі його власні значення, то можна обчислити параметри акустичної лінійності $L_{ij} = \mu_{ij} / \mu_m$ і акустичної сланцоватості $S_{ij} = \mu_{ij} / \mu_p$. Тут μ_p , μ_m , μ_p – відповідно, найбільше, проміжне і найменше власні значення ефективного акустичного тензора μ_{ij} .

Пряма лінія, яка проведена під кутом 45° до осі абсцис розрізняє аксіальні і планальні текстури.

Коефіцієнт акустичної анізотропії A_{ij} обчислювався за формулою:

$$A_{ij} = \left[\frac{\frac{1}{3}[(\mu_p - \mu_m)^2 + (\mu_m - \mu_p)^2 + (\mu_p - \mu_p)^2]}{\mu_p^2 + \mu_m^2 + \mu_p^2} \right]^{1/2} \cdot 100\% \quad (6)$$

Характеристикою орієнтації структурних елементів моделі вважається функція розподілу орієнтації (ФРО).

$$f(\varphi_1, \theta, \varphi_2) = \sum_{l=0}^4 \sum_{m=-l}^l \sum_{n=-l}^l W_{lmn} P_{lmn}(\varphi_1, \theta, \varphi_2) \quad (7)$$

де $P_{lmn}(\varphi_1, \theta, \varphi_2)$ – узагальнена сферична функція; $\varphi_1, \theta, \varphi_2$ – кути Ейлерового орієнтаційного простору.

Алгоритм забезпечує необхідний об'єм чисельних розрахунків для побудови стереопроєкцій ізоліній всіх без виключення параметрів анізотропії пружних хвиль. Для побудови стереопроєкцій полюсної діаграми функції орієнтації тріщин використовуються співвідношення [3]:

$$q(\varphi, \theta) = \sum_{l=0}^4 \sum_{m=-l}^l \Omega_{lm} P_l^m(\cos \theta) e^{-im\varphi} \quad (8)$$

$$\Omega_{lm} = 2\pi \left(\frac{2}{2l+1} \right)^{1/2} \sum_{n=-l}^l P_l^m(\cos \xi) e^{in\varphi} \quad (9)$$

де $P_l^m(\cos \theta)$, $P_l^m(\cos \xi)$ – нормалізований присадний поліном Лежандра; θ, φ – полярний і азимутальний кути сферичної системи координат зразка породи-колектора; ξ, ϕ – полярний і азимутальний кути сферичної системи координат сфероїдальної тріщини.

Метод інверсії азимутальної залежності фазових швидкостей у функцію розподілу орієнтації мінералів і тріщин забезпечує повний розв'язок задачі визначення об'ємної моделі тріщино-порового простору складнопобудованої породи-колектора та кількісної оцінки його фільтраційно-ємнісних властивостей.

Одним із основних факторів пружної анізотропії гірських порід є орієнтація та пружна симетрія її структурних елементів – матриці породи та систем мікротріщин. Для їх оцінки використовувалися дослідження азимутальної залежності швидкостей розповсюдження пружних хвиль моделей карбонатних порід-колекторів різних типів пустотного простору (рис. 2).

Отриманні результати математичного моделювання по вивченню моделей вапняків різної структури пустотного простору (табл. 1, рис. 1-3) дозволяють зробити певні висновки відносно пружної симетрії порід, класифікації їх за ефективними пружними параметрами.

Текстури досліджених порід відносяться до класу планальних і аксіальних текстур моноклінної симетрії.

Стереопроєкції вказівних поверхонь фазових швидкостей квазіповздовжньої хвилі мають від 2 до 4 локальних максимуми, які не співпадають з віссю X_3 (типовий приклад дослідження гранулярно-тріщинно-кавернозного вапняку див. на рис. 4). Ці напрямки відповідають поздовжній нормалі, оскільки кути відхилення вектора зміщень для квазіповздовжньої хвилі від напрямку хвильової нормалі у всіх моделях не досягають 5° , а в основному, складають $0,5^\circ - 2,5^\circ$. Крім цього на стереопроєкціях виділяються від 2 до 4 максимумів. Ці напрямки є повздовжніми нормаллями, вздовж яких і розповсюджуються чисто повздовжні хвилі. Максимальна різниця між "швидкою" і "повільною" поперечними хвилями складає в основному, $0,02 - 0,3$ км/с та досягає значень $1,2$ км/с в тріщинному колекторі, що вказує на ефекти акустичного двопронезаломлення та поляризації навіть у породах із невеликими коефіцієнтами анізотропії. Знайдені близькі до нуля значення ($v_{s1} - v_{s2} = 0,02$), що вказує на наявність акустичних осей, в оточенні яких спостерігаються ділянки нерозщеплення поперечних хвиль тобто ділянки однорідності середовища.

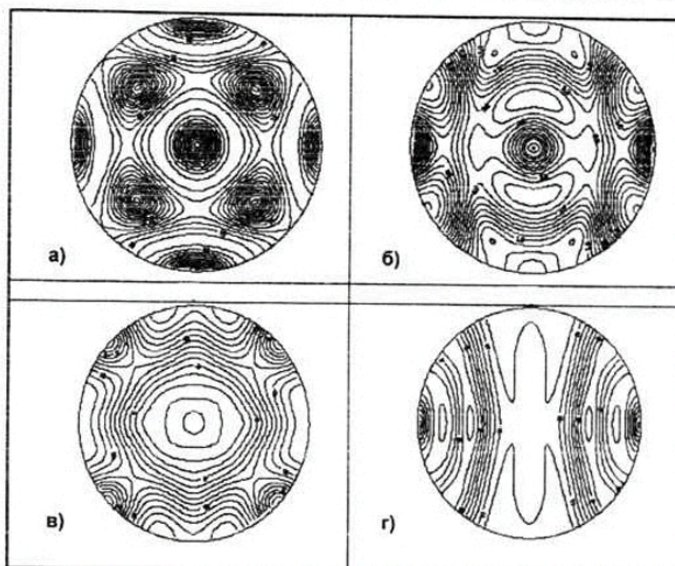


Рис.2. Стереопроєкції вказівних поверхонь коефіцієнту інтегральної анізотропії вапняків різної структури пустотного простору (а-гранулярно-кавернозно-тріщинний, б- гранулярно-кавернозний, в- гранулярний, г-кавернозний)

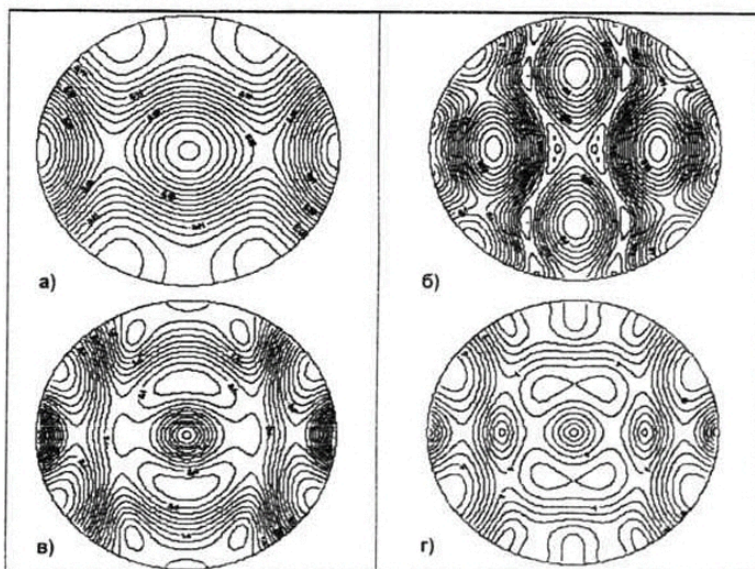


Рис. 3. Стереопроєкції вказівних поверхонь параметрів анізотропії гранулярно-тріщинно-кавернозного вапняку (а – фазової швидкості квазіповздовжньої хвилі, б – різниці між "швидкою" та "повільною" фазовими швидкостями квазіпоперечних хвиль, в – коефіцієнту середньоквадратичної пружної анізотропії, г – кута відхилення вектору пружних зміщень від напрямку хвильової нормалі квазіповздовжньої хвилі)

Таблиця 1. Результати математичного моделювання акустичних і пружних параметрів вапняків із різною структурою пустотного простору

Тип колектора	Пружні постійні породи									Компоненти акустичного тензора			A _v (%)
	C ₁₁	C ₂₂	C ₃₃	C ₄₄	C ₅₅	C ₆₆	C ₁₂	C ₁₃	C ₂₃	μ ₁₁	μ ₂₂	μ ₃₃	
Тріщинний	69,58	74,68	73,4	15,59	15,84	15,01	37,15	37,67	38,47	40,27	42,19	41,32	1,9
Гранулярний	78,95	84,76	83,33	21,24	21,53	21,02	34,15	35,53	36,02	49,27	51,48	50,71	1,79
Кавернозний	82,48	88,33	87,23	22,09	22,41	22,09	35,48	37,33	37,86	50,63	52,81	51,73	1,73
Гранулярно-тріщинний	72,36	77,64	76,37	17,54	17,82	17,63	35,61	36,45	37,12	42,98	44,95	41,73	1,83
Гранулярно-кавернозний	80,65	86,45	85,19	21,63	21,95	21,42	34,98	36,42	36,92	49,92	52,09	51,17	1,74
Кавернозно-гранулярний	83,33	89,3	88,0	22,2	22,52	22,32	36,43	37,92	38,47	51,12	53,35	53,12	1,75
Кавернозно-тріщинний	76,59	82,02	80,9	18,25	18,66	18,72	38,03	39,01	39,72	45,14	47,12	46,46	1,75
Тріщино-кавернозний	75,96	81,36	80,25	18,28	18,69	18,43	37,34	38,39	39,02	45,07	47,04	46,03	1,76
Тріщино-гранулярний	72,74	77,99	76,77	17,49	17,9	17,68	35,81	36,68	37,31	43,14	45,65	44,61	1,74
Гранулярно-тріщинно-кавернозний	62,83	67,5	66,29	15,47	15,83	15,16	30,29	30,93	31,44	39,24	41,02	43,32	1,81

Закінчення табл. 1

Тип колектора	Пружні постійні породи									Компоненти акустичного тензора			A _n (%)
	C ₁₁	C ₂₂	C ₃₃	C ₄₄	C ₅₅	C ₆₆	C ₁₂	C ₁₃	C ₂₃	μ ₁₁	μ ₂₂	μ ₃₃	
Гранулярно-кавернозно-тріщинний	72,07	77,25	76,1	17,08	17,5	17,1	36,01	36,83	37,48	42,58	44,5	43,22	1,77
Тріщинно-гранулярно-кавернозний	82,31	88,14	86,98	21,95	22,31	22,11	35,85	37,35	37,85	49,38	51,49	49,53	1,71
Тріщинно-кавернозно-гранулярний	84,48	90,47	89,28	22,54	22,87	22,73	36,84	38,38	38,93	51,55	53,77	52,81	1,72
Кавернозно-тріщинно-гранулярний	79,56	82,25	84,03	20,96	21,31	21,01	35,25	36,6	37,11	48,57	50,67	49,63	1,73
Кавернозно-гранулярно-тріщинний	78,15	83,8	82,54	20,58	20,91	20,93	34,73	36,01	36,59	47,72	49,82	49,84	1,76

Таким чином, досліджені моделі складнопобудованих карбонатних порід-колекторів із різною структурою пустотного простору: отримані по всім типам карбонатних порід-колекторів їх пружні постійні, вивчені орієнтація та пружна симетрія швидкостей розповсюдження пружних хвиль та інтегральної анізотропії, побудовані стереопроєкції вказаних поверхонь параметрів анізотропії для вказаних моделей колекторів.

Надбана інформація може бути використана як попереднє наближення при вивченні структури пустотного простору та фільтраційно-ємнісних властивостей реальних складнопобудованих карбонатних порід-колекторів за акустичними даними геофізичних досліджень свердловин та при петроакустичних дослідженнях [7, 8].

1. Маслов Б.П., Продайвода Г.Т., Вижва С.А. Математическое моделирование влияния давления и температуры на скорость распределе-

ния упругих волн в трещиноватых горных породах // Геофиз журн – 2000. – Т.22, №3. – С.113-118. 2. Продайвода Г.Т. Основы сейсмоакустики. Навчальний посібник. – Київ: ВПЦ "Київський університет", 2001. – 296 с. 3. Продайвода Г.Т., Вижва С.А. Математичне моделювання геофізичних параметрів. К.: ВПЦ "Київський університет", 1999. – 112 с. 4. Лукін А.Е., Ларін С.Б. Генетические типы трещиноватости пород глубоководных нефтяногазовых комплексов // Геол журн – 2003. – N 3. – С. 9-25. 5. Saito Tokumi, Abe Mamoru. "Буцури танко. Butsuri tanko, Geophys. Explor.", 1984, 37, №1, 15-26. 6. Sellier E. Bousquet Ph., Boichard R., Brun R. Estimation of the effective porosity of the Dogger oolitic limestone in the Villeperdue oil-field. 1991, Paris basin France. – С.241-248. 7. Вижва С.А., Безродна І.М. Прогноз фільтраційно-ємнісних властивостей порід-колекторів на основі визначення структури пустотного простору за даними комплексу методів ГДС // Геоінформатика. – 2005. – м. Київ, N 1, С. 67-70. 8. Вижва С.А., Безродна І.М. Оцінка структури пустотного простору порід-колекторів кори вивітрювання та поверхні кристалічного фундаменту за даними акустичних методів // Мінеральні ресурси України. – 2004. – Київ, С. 38-42.

Надійшла до редколегії 09.02.07

К.М. Бондар, канд. геол. наук, Ю.М. Дмитрук, канд. с.-г. наук, І.В. Віршило, канд. геол. наук, Ж.М. Матвіїшина, д-р геогр. наук

МАГНІТНА СПРИЙНЯТЛИВІСТЬ ТА ВМІСТ ВАЖКИХ МЕТАЛІВ У ЧИСТИХ І ПРОМИСЛОВО ЗАБРУДНЕНИХ ҐРУНТАХ ПІВНІЧНОЇ АСТУРІЇ (ІСПАНІЯ)

У статті розглянутий розподіл магнітної сприйнятливості і вмісту важких металів у фоні та забруднених ґрунтах Північної Астурії (Іспанія).

The lateral and vertical distribution of magnetic susceptibility and heavy metals content in non-polluted and polluted soils from Northern Asturias is considered.

Вступ. Актуальна проблема північної частини провінції Астурія (Іспанія) – необхідність діагностики та контролю забрудненості ґрунтового покриву пилогазовими викидами металургійних, цементних заводів і теплових електростанцій. Ґрунти, зберігаючи сліди всіх процесів в екосистемах, вважаються маркерами якісного стану останніх. Оптимальними при цьому є системні дослідження з використанням магнітних методів, ефективних та експресних при оцінці антропогенної динаміки ґрунтового покриву [1-20]. В основі екомагнітної технології лежить явище підвищення або пониження магнітної сприйнятливості та інших магнітних характеристик ґрунтів, внаслідок випадання на їх поверхню і подальшої радіальної міграції дрібнодисперсного техногенного пилу.

Магнітні властивості ґрунтів змінюються у залежності від присутності у них феромагнітних мінералів серед яких найважливішими є магнетит, титаномагнетит, магнетит, гематит, гетит, піротин та грейгіт. Власне оксиди й гідроксиди заліза нетоксичні, однак вони мають здатність сорбувати важкі метали [6]. Діяльність людини супроводжується накопиченням у ґрунті техногенних феромагнетиків, або антропогенною трансформацією властивостей ґрунтів, що призводить до перетворення первинних магнітних мінералів. Показано, що техногенний магнетит може бути джерелом важких металів, ге-

незис яких пов'язаний з ізоморфними замінами у ґрунтах при руйнуванні мінералу.

Постановка завдання. Стратегія роботи передбачає комплексний аналіз із інтерпретацією результатів вимірювань магнітної забрудненості ґрунтів і їх чистих аналогів з місць локалізації теплових електростанцій, цементних заводів, а також підприємств чорної металургії в провінції Астурія (Іспанія).

Еколого-геохімічна характеристика території забезпечується на основі системного ґрунтоцентричного підходу. Атмосферне забруднення феромагнітними мінералами і важкими металами спостерігається, насамперед, у поверхневих горизонтах, що пояснюється утворенням металоорганічних комплексів з органічною речовиною. Радіальні потоки переносять політанти на деяку глибину. Тому дослідження змін якісного стану ґрунтів обов'язково включає аналіз всіх генетичних горизонтів профілю. Крім того, техногенний магнетизм необхідно відокремити від природного, зумовленого наявністю педогенних та літогенних магнітних мінералів у ґрунті [7].

Сучасний стан проблеми. Різке зростання величини магнітної сприйнятливості (k_x) у поверхневих горизонтах забруднених ґрунтів встановлено багатьма дослідниками [1-5 та ін.]. Оцінка забруднення ґрунтів на основі магнітної сприйнятливості успішно проводилась