

СЕЙСМОГРАВІТАЦІЙНИЙ ЕФЕКТ ВІД РЕЗЕРВУАРУ НАФТИ ТА ГАЗУ В ПОРОДАХ КРИСТАЛІЧНОГО ФУНДАМЕНТУ ЗА ДАНИМИ МАТЕМАТИЧНОГО МОДЕЛЮВАННЯ

Проведено математичне моделювання ефективних пружних та акустичних властивостей гранітних порід-колекторів з різною структурою пустотного простору. Визначені акустичні властивості гранітного порово-тріщинного колектору. Розроблений і опробований алгоритм і програма для розв'язку задачі спільної інверсії сейсмічних і гравіметричних даних, в основі якої лежить наближення Борна для просторово-часової функції Гріна з середньоквадратичною фоновою швидкістю для горизонтально-шаруватого середовища (на прикладі моделі Прикерченського шельфу).

Ключові слова: математичне моделювання; сейсмогравітаційний метод; сейсмічні швидкості; густина.

Кристалічний фундамент розглядається як один з перспективних нафтогазоносних об'єктів, для якого вірогідність відкриття крупних родовищ є надзвичайно високою. Накопичений світовий досвід пошуків нафти і газу в кристалічному фундаменті свідчить про значні труднощі їх виявлення традиційними сейсмічними методами, що пояснюється їх значною неоднорідністю за складом, складною будовою, приуроченістю до розуцільнених зон різної генетичної природи.

Значні труднощі пов'язані з надзвичайно низьким рівнем теоретичних та експериментальних петрофізичних досліджень тріщинних, тріщинно-кавернозних та порово-тріщинно-кавернозних колекторів кристалічного фундаменту, як на зразках керну, так і методами ГДС. В зв'язку з цим, на перший план виступає задача математичного моделювання ефективних петрофізичних характеристик кристалічних порід-колекторів на моделях реально наближених до реальних об'єктів із застосуванням сучасних методів механіки стохастичного середовища.

Для виявлення розуцільнених зон в породах кристалічного фундаменту пропонується сейсмогравітаційний метод, в основі якого лежить багатоконпонентна тріщино-порово-кавернозна (газо- чи нафтонасичена) модель кристалічного колектору.

З метою оцінки можливостей запропонованого методу проведено математичне моделювання ефективних пружних та акустичних властивостей гранітів із різною структурою пустотного простору. Одержані результати використовуються як для побудови швидкісних та густинних моделей, так і при моделюванні інтенсивності розсіяного сейсмічного поля та гравітаційного ефекту від газо- і нафто насичених зон в кристалічному фундаменті.

Для чисельних розрахунків *ефективних акустичних властивостей* порово-тріщино-кавернозного гранітного колектору застосовувалась багатоконпонентна модель, яка вміщувала пустоти різного формату і твердий скелет (матрицю). Методом умовних моментних функцій із застосуванням розрахункової схеми Морі-Танака розраховувались ефективні пружні постійні моделі, за допомогою яких визначались їх акустичні властивості.

Вплив мінералогічного складу на швидкості повздожних і поперечних хвиль та густину матриці порід гранітного складу ілюструється на 8 моделях, кількісний мінералогічний склад яких змінюється в таких межах: калієвий польовий шпат (КРш) – 25-60 %, кислий плагіоклаз (Pl) – 15-45 %, біотит (Bi) – 3-8 %, кварц (Q) – 25-40 %.

Швидкості повздожних і поперечних хвиль моделей коливаються в досить вузьких межах $V_p = 6,02-6,13$ км/с, $V_s = 3,53-3,66$ км/с, а густина – 2,581-2,625 г/см³. Інтервальний час в моделях скелету гранітів коливається в межах: ΔT_p – від 163 до 166 мкс/м, ΔT_s – від 273 до 283 мкс/м.

Вплив структури пустотного простору на швидкості повздожних і поперечних хвиль гранітного колектору досліджували на моделях з різним форматом пустот. Для тріщинних гранітних колекторів найбільший вплив спостерігається в моделях з форматом пустот $\alpha = 10^3, 10^4$. Зменшення швидкостей повздожних і поперечних хвиль до аномально низьких величин викликає концентрація тріщин значно менша за 1 %. Вплив каверн з форматом $\alpha = 10, 10^3$ на швидкості хвиль набагато менший.

Чутливим індикатором типу колектору є відношення V_p/V_s , величина якого набагато менше 1,7 для колекторів-гранітів тріщинного типу. Поріві і кавернозні гранітні колектори за величиною цього параметру відрізняються набагато менше.

Для гранітних тріщинуватих колекторів криві інтервального часу ΔT_p різко зростають при незначних (менше 1 %) концентраціях тріщин формату $\alpha = 10^3, 10^4$. Для кавернозних гранітних колекторів, навпаки, тяжіють до осі абсцис і значно менше чутливі до зміни формату каверн. В результаті чисельних розрахунків ефективних пружних і акустичних властивостей порово-тріщинно-кавернозного гранітного колектору методом умовних моментів, із застосуванням схеми Морі-Танака, одержані наступні параметри для сейсмогравітаційного моделювання:

– для гранітного колектору насиченого газом – $K = 4,37$ ГПа, $G = 5,29$ ГПа, $\rho = 2,29$ г/см³, $V_p = 2,23$ км/с, $V_s = 1,52$ км/с, $V_p/V_s = 1,469$, $K_n = 12,0$ %;

– для гранітного колектора насиченого нафтою – $K = 33,49$ ГПа, $G = 7,35$ ГПа, $\rho = 2,396$ г/см³, $V_p = 4,25$ км/с, $V_s = 1,75$ км/с, $V_p/V_s = 2,43$.

Для оцінки ефективності сейсмічних методів при пошуках резервуарів нафти і газу в породах кристалічного фундаменту використовується спрощена горизонтально-шарувата модель, яка за своїми характеристиками була максимально наближена до реального геологічного розрізу верхньої частини Прикерченського шельфу. За результатами інтерпретації даних ГСЗ тут виступ кристалічного фундаменту ймовірно представлений гранітами. Параметри сейсмічної горизонтально-шаруватої моделі наведені в табл. 1. Збурення і реєстрація сейсмічних хвиль здійснюється в шарі морської води.

Для чисельного моделювання сейсмічного поля використовується наближений метод Борна з середньоквадратичною вертикальною фоновою швидкістю.

За результатами чисельних розрахунків видно, що добре виділяються інтервали, які відповідають розуцільненим зонам заповненим газом або нафтою. Зрозуміло, що інтервали заповнені газом фіксуються більш контрастними змінами на кривій $G(t)$. Таким

чином, незважаючи на досить контрастний сейсмічний і густинний розрізи і застосування наближеного методу Борна для чисельних розрахунків функції Гріна, параметри п'ятишарової моделі Прикерченського шельфу відображаються достатньо надійно. Але зауважимо, що відносно невеликі похибки при визначенні густини здійснюють значний вплив на відновлення швидкостей сейсмічних хвиль, що важливо прийняти до уваги при побудові алгоритмів інверсії.

Для оцінки початкового наближення сейсмічних швидкостей і густини п'ятишарової моделі Прикерченського шельфу був розроблений спеціальний алгоритм чисельних розрахунків, в основу якого покладені рекурентні співвідношення. Результати розрахунків свідчать, що надійність одержаних оцінок початкового наближення виявилася невисокою. В подальшому для підвищення точності розрахунків початкового наближення доцільно використовувати сейсмічні дані МСГТ (методу спільної глибинної точки) до підсумовування. Це може суттєво покращити надійність оцінок, особливо при інверсії реальних даних, які спотворені завадами.

Таблиця 1

Параметри сейсмічної горизонтально-шаруватої моделі Прикерченського шельфу

Номер шару n	Вертикальна координата границі Z_n , м	Густина шару ρ_n , кг/м ³	Швидкість розповсюдження повздовжніх хвиль V_p , км/с	Примітка
0	100	1000	1500	Шар морської води
1	1000	1850	2050	Шар неуцільнених покладів
2	1700	2200	2250	Шар напівуцільнених покладів
3	2700	2400	2750	Шар уцільнених покладів
4	2900	$\frac{2396}{2290}$	$\frac{4251}{2230}$	Шар розуцільнених гранітів насичених нафтою (чисельник) або газом (знаменник) ($K_n = 12\%$)
5	-	2603	6,064	Монолітні граніти

Після визначення початкового наближення здійснюється *інверсія сейсмічних даних* у розподіл сейсмічної швидкості і густини, в основі якої лежить задача глобальної оптимізації. Збіжність ітераційного процесу в значній мірі залежить від того наскільки значення початкового наближення відрізняються від їх реальних величин, навіть при інверсії модельних наборів даних, які не обтяжені похибками, що обумовлені завадами притаманними реальним сейсмічним даним.

Результати інверсії сейсмічних даних в розподіл сейсмічної швидкості наведені на рис. 1. Як видно з рисунку, практично на усіх кривих достатньо виразно можна виділити шари розуцільненої зони, заповненої нафтою. Тобто, основні характерні особливості розподілу густини і сейсмічної швидкості моделі відображаються задовільно. Проте, знайдені значення густини і швидкості для зони заповненої газом виявились сильно заниженими. Однією з причин цього безумовно є більш значний вплив на функцію

Гріна густини шарів розрізу, а також недостатня надійність визначення початкового наближення.

Нами була зроблена спроба підвищити стійкість і прискорити збіжність ітераційного процесу відновлення сейсмічної швидкості і густини. Цьому сприяла, безумовно, і аналітична форма просторово-часової функції Гріна для горизонтально-шаруватої моделі в наближенні Борна, до якої в явній формі входять сейсмічні швидкості і густина.

Як показали чисельні розрахунки, відносний вклад розуцільнених зон, насичених газом і нафтою, в сумарний гравітаційний ефект невеликий і складає біля 8 мГал. Причому, гравітаційний ефект розуцільненої зони заповненої нафтою, дещо більший ніж заповненої газом: відповідно, 8,3 мГал і 7,9 мГал. Ця різниця, очевидно, буде значно більшою, якщо розуцільнені зони будуть мати більшу потужність та меншу глибину. В нашому випадку потужність розуцільненої зони лише 200 м.

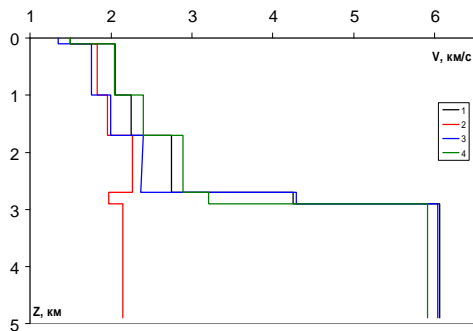


Рис. 1. Розподіл сейсмічних хвиль в п'ятишаровій моделі з розущільненою зоною заповненою нафтою за даними інверсії: 1 – швидкість сейсмічних хвиль в шарах моделі з розущільненою зоною (шар 4); 2 – початкове наближення швидкості сейсмічних хвиль; 3 – швидкість сейсмічних хвиль за даними інверсії сейсмічних даних; 4 – швидкість сейсмічних хвиль за даними інверсії сейсмічних і гравіметричних даних.

Крім того, був апробований окремий алгоритм інверсії гравіметричних даних у розподіл густини. Результати цієї інверсії допомогли суттєво покращити початкове наближення густини розрізу. Отримані дані також винесені на рис. 1, де представлені і результати спільної інверсії сейсмічних і гравіметричних даних. Як можна бачити, найбільш надійними є оцінки параметрів сейсміч-

ної швидкості і густини одержані саме при спільній інверсії. Ці результати підтверджують доцільність комплексування сейсмічних та гравіметричних даних при пошуках нафти і газу у кристалічному фундаменті.

На основі проведеного математичного моделювання акустичних властивостей гранітних порідколекторів визначений значний вплив на швидкості повздовжніх і поперечних хвиль структури пустотного простору, а також газо- і нафтонасичення. Визначенні акустичні властивості гранітного порово-тріщинно-кавернозного колектора.

Розроблений та апробований алгоритм і програма для розв'язку задачі спільної інверсії сейсмічних і гравіметричних даних, в основі якої лежить наближення Борна для просторово-часової функції Гріна з середньоквадратичною фоновією швидкістю для горизонтально-шаруватого середовища.

Як свідчать отримані дані, незважаючи на те, що метод Борна дає не завжди надійні результати, для випадків з контрастними змінами густини і швидкості, спільна інверсія сейсмічних і гравітаційних даних підтвердила його працездатність. На прикладі моделі Прикерченського шельфу показано, що наявність в гранітах розущільненої зони, заповненої газом або нафтою, може бути впевнено визначена за результатами сейсмічних і високоточних гравітаційних спостережень.

Розроблений алгоритм і програму можна успішно застосувати для пошуків і розвідки розущільнених зон і в теригенних осадових товщах, зокрема, в глинистих породах.

СЕЙСМОГРАВИТАЦИОННЫЙ ЭФФЕКТ ОТ РЕЗЕРВУАРА НЕФТИ И ГАЗА В ПОРОДАХ КРИСТАЛЛИЧЕСКОГО ФУНДАМЕНТА ПО ДАННЫМ МАТЕМАТИЧЕСКОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ

С.А. Выжва, Г.Т. Продайвода, П.Н. Кузьменко, О.А. Козионова

Проведено математическое моделирование эффективных упругих и акустических свойств гранитных пород-коллекторов с различной структурой пустотного пространства. Определены акустические свойства гранитного порово-трещинного коллектора. Разработан и опробован алгоритм и программа для решения задачи совместной инверсии сейсмических и гравиметрических данных, в основе которой лежит приближение Борна для пространственно-временной функции Грина с среднеквадратической фоновой скоростью для горизонтально-слоистой среды (на примере модели Прикерченского шельфа).

Ключевые слова: математическое моделирование; сейсмогравитационный метод; сейсмические скорости; плотность.

SEISMIC-GRAVITATIONAL EFFECT OF OIL AND GAS RESERVOIR IN ROCKS OF THE CRYSTALLINE BASEMENT ON THE BASE OF MATHEMATICAL MODELING

S. Vyzhva, G. Prodaivoda, P. Kuzmenko, O. Kozionova

Mathematical modeling of effective elastic and acoustic properties of granite reservoir rocks that has different pore space structure was done. The acoustic properties of granite porous-cracks reservoir were determined. The algorithm and software for solving the problem of joint inversion of seismic and gravimetric data based on Born's approximation for the space-time Green's function with meansquare background velocity for the horizontally-layered medium has been developed and tested (on an example of the Prykerch shelf model).

Keywords: mathematical modeling; seismic-gravitational method; seismic velocity; density.