

УДК 553.98.2:551.24:552.5(477/7)

Л. В. СКАКАЛЬСЬКА, А. В. НАЗАРЕВИЧ

Карпатське відділення Інституту геофізики ім. С.І. Субботіна НАН України, Україна, 79060, Львів, вул. Наукова, 3-б, тел./факс +38(032)2648563, e-mail: Skakalska.sbighp@gmail.com, nazarevych-a@cb-igph.lviv.ua

ПРОГНОЗУВАННЯ НАФТОГАЗОВОДОНАСИЧЕНОСТІ ПОРІД РІЗНОЇ ЛІТОЛОГІЇ ТА ГЕОДИНАМІЧНОГО ГЕНЕЗИСУ У РОЗРІЗАХ СВЕРДЛОВИН

Мета. Метою роботи є розробка методики прогнозування нафтогазоводонасиченості порід у розрізах свердловин за даними акустичного (сейсмічного) каротажу (АК, СК) і кернових досліджень (КД) та апробація її для дослідження геологічних розрізів свердловин з породами різної літології та геодинамічного генезису. **Методика.** Основою методики є теоретично встановлені співвідношення між пружними параметрами порід, що враховують вплив діючого тиску (глибини), пористості, нелінійної пружності відповідно до структурних і розсіювальних особливостей гірських порід (шаруватості, мікропористості). З використанням параметричної бази даних для порід-колекторів конкретних територій та геологічних структур встановлюються емпіричні залежності між фізичними та колекторськими властивостями породи. Порівнюючи результати обчислення швидкостей за теоретичними та емпіричними залежностями зі фактичними даними АК прогнозується тип заповнювача пор. Для випадків відсутності даних АК (СК) для досліджуваних свердловин чи окремих інтервалів їх розрізів розроблено варіант методики з встановленням і використанням кореляційних співвідношень та даних гамма-каротажу (ГК). Програмне забезпечення для реалізації методики розроблено в середовищі Fortran і Excel. **Результати.** Розроблена методика апробована на даних свердловин ряду структур Західного нафтогазоносного регіону України (Залужанської, Ліщинської, Бучачської, Лудинської). Для окремих свердловин виявлено не зафіксовані попередніми дослідженнями тонкі (від 0,1 м) прошарки зі суттєвою пористістю і заповненням газом, водою, нафтою, а також прошарки з практично нульовою пористістю, які можуть слугувати екранами. Простежено зміни пружних (швидкостей пружних хвиль, модуля зсуву, стисливості, модуля об'ємного тиску, густини тощо) та колекторських (пористості) характеристик наявних у розрізах досліджуваних свердловин порід (глин, мергелів, алевролітів, вапняків, пісковиків, сланцевих товщ) в залежності від тиску (глибини). На основі цих даних спрогнозовано нафтогазоводонасиченість (пористість та тип заповнювача пор) досліджених горизонтів розрізів. Простежено відмінності у пружних та колекторських характеристиках порід різного віку, типу та геодинамічного генезису – теригенно-карбонатних (карбон, девон), карбонатних (девон, силур, кембрій), теригенних (девон, силур). **Наукова новизна.** Новизною дослідження є методичні підходи до математичного моделювання порід-колекторів як пористого пружного геофізичного середовища з використанням у теоретичних розрахунках параметра стисливості порід та емпіричних кореляційних співвідношень між пружними параметрами, пористістю та флюїдонасиченістю порід за даними АК і ГК. Новими є самі емпіричні кореляційні співвідношення, що пов'язують ефективний тиск, пористість і стисливість для сухої та насиченої рідиною породи. Вони придатні для дослідження геологічних розрізів конкретних свердловин, для порід різного типу та геодинамічного генезису. Також новим результатом є вперше спрогнозовані у розрізах низки свердловин тонкі нафто-, водо-, газонасичені шари і прошарки. За розрахунками також відстежуються зони низьких швидкостей. **Практична значущість.** Методика забезпечує надійне прогнозування фізичних характеристик і нафтогазоводонасиченості пластів порід різної товщини (включаючи тонкі пласти – від 0,1–0,2 м) у розрізах свердловин: коефіцієнта пористості, пружних модулів, виявлення за даними АК (СК, ГК) типу флюїдонасичення, виявлення пасток неструктурного типу. Побудовано вирази для обчислення коефіцієнтів до відповідних емпіричних співвідношень, справедливих для довільного геологічного регіону з наявною параметричною базою даних.

Ключові слова: математичне прогнозування; нафтогазоводонасиченість порід; акустичний каротаж; гамма-каротаж; кернові дослідження; Західний нафтогазоносний регіон України; традиційні та нетрадиційні поклади вуглеводнів.

Вступ

Прогнозування наявності нафти і газу в колекторах зі складною будовою здійснюється на основі фізико-геологічних моделей з багатьма параметрами. Через складність повного відтворення за допомогою цих моделей реального геологічного середовища часто результатом є недостатня точ-

ність визначення петрофізичних (пружних, фільтраційно-ємнісних, швидкісних) характеристик і типу насичення порід-колекторів [Вижва, 2006].

Для надійного прогнозу типу заповнювача порід-колекторів зі складною структурою порового простору, особливо, для складнопобудованих колекторів з неоднорідним мінералогічним складом їх скелету, незважаючи на наявність низки ві-

домих методик [Вижва, 2011; Красножон, 2013; Хекало, 2012; Продайвода, 2006; ZhenYu, 2013], все ще існує потреба в уточнених і ефективніших методиках прогнозування їх флюїдонасичення, у створенні досконаліших фізико-геологічних моделей на основі комплексного вивчення результатів петрофізичних досліджень та іншої геофізичної інформації.

Якість розрахунків також залежить від надійності параметричної бази характеристик порід-колекторів досліджуваного регіону.

Мета

Метою і завданнями роботи є:

- розробити методику прогнозування нафтогазоводонасиченості порід у розрізах свердловин за даними акустичного чи сейсмічного каротажу (АК, СК) і кернових досліджень (КД);
- встановити необхідні кореляційні співвідношення для варіанта методики з використанням даних інших каротажів, зокрема, гамма-каротажу;
- випробувати методику для вивчення геологічних розрізів свердловин з породами різної літології та геодинамічного генезису.

Методика

Фізичною основою пропонованої методики є вплив пружних характеристик і пористості порід, тиску і типу заповнювача пор на швидкості поширення у цих породах пружних хвиль.

Ідея методу полягає у тому, щоб, отримавши швидкості поширення пружних хвиль у породах розрізів свердловин за даними акустичного чи сейсмічного каротажу і максимально точно врахувавши вплив інших факторів (тиску, температури, літології тощо) на ці швидкості, виділити ефекти, спричинені пористістю і заповнювачем пор, і шляхом порівняння фактичних величин цих ефектів з відомими значеннями (отриманими за даними кернових досліджень, а також для інших, уже досліджених свердловин), зробити висновки про коефіцієнт пористості і тип заповнювача пор (вода, нафта чи газ).

Загальний алгоритм реалізації методики такий – розраховують швидкості поширення пружних хвиль у породах розрізів свердловин з максимально точним урахуванням пружних та колекторських параметрів цих порід, порівнюють отримані величини з відомими значеннями (даними акустичного чи сейсмічного каротажу) і роблять висновки про пористість і тип заповнювача пор порід (вода, нафта чи газ). Аналіз числових значень розрахованих параметрів дає змогу виділити ефекти, спричинені, наприклад, пористістю, літологічними особливостями чи заповнювачем пор порід.

В основі розробленої нами методики [Скакальська, 2013, 2014а, 2014б, 2015; Скакальська, Назаревич, 2014, 2015] лежать теоретично встановлені співвідношення між пружними параметрами

гірських порід [Вербицький, 1977, 2002; Вербицький та ін., 1985], які враховують вплив на них тиску (глибини), пористості, нелінійної пружності з урахуванням структурних і розсіювальних особливостей порід (шаруватість, мікропористість). Емпіричні залежності між фізичними та колекторськими властивостями цих порід будують з урахуванням параметричної бази петрофізичних характеристик порід-колекторів для конкретних нафтогазоносних територій. У результаті порівняння обчислених за отриманими теоретичними та емпіричними залежностями швидкостей пружних хвиль з фактичними даними АК (СК) прогнозується коефіцієнт пористості і тип заповнювача пор. За відсутності даних АК (СК) для свердловин або окремих інтервалів їх розрізу побудовані кореляційні співвідношення для досліджень за методикою з використанням даних гамма-каротажу (ГК).

Теоретичні основи методу

З погляду математичного моделювання досліджуване середовище розглядається двофазним, квазіоднорідним та ізотропним [Вербицький, 1977; Петкевич, 1970, 1979] (через малість впливу на дані стандартних методик АК і СК його анізотропних параметрів і малість величин пор та тріщин порівняно з довжинами зондуючих хвиль АК і СК), з ефективними модулями пружності та довільною кількістю включень. Автори цієї моделі [Вербицький, 2002] дали фундаментальне обґрунтування геофізичної коректності побудови цих теоретичних співвідношень між параметрами пружних хвиль, тиском (глибиною), типом заповнювача пор у породах і фізико-механічним станом мікротріщинуватого середовища. Розроблена нами на цій основі прогнозна методика [Скакальська, 2013, 2014а, 2014б, 2015] базується на використанні побудованих для цієї моделі теоретичних, а також встановлених нами за даними параметричної бази відповідних емпіричних співвідношень, що відповідають повній густинно-пружній характеристиці геологічного середовища.

Для практичних розрахунків за методикою (див. далі) використано результати акустичного та гамма-каротажів. Основними досліджуваними параметрами є швидкості пружних хвиль.

Отже, для визначення типу наповнювача пор порід за нашою методикою записано формули для обчислення швидкостей пружних хвиль (V_p , V_s) у породах для подальшого порівняння обчислених для конкретних глибин величин із значеннями швидкостей, отриманих за даними каротажних досліджень. Відповідати реальній ситуації щодо типу заповнювача флюїду будуть ті теоретично розраховані величини, які найближчі за значенням до каротажних даних. Формули для обчислення швидкостей пружних хвиль містять пружні модулі, різні для сухих і флюїдонасичених порід:

$$V_p^{c(\phi)} = \sqrt{\frac{3/\beta^{c(\phi)} + 4\mu^{c(\phi)}}{3\rho^{c(\phi)}}}; \quad V_s^{c(\phi)} = \sqrt{\frac{\mu^{c(\phi)}}{\rho^{c(\phi)}}}, \quad (1)$$

де $\beta^{c(\phi)}$, $\mu^{c(\phi)}$, $\rho^{c(\phi)}$ – стисливість, модуль зсуву, густина для сухих (с) чи флюїдонасичених (ф) порід; V_p, V_s – швидкості поздовжньої та поперечної хвиль за АК.

Розрахунок об'ємної густини для кожного досліджуваного шару виконано за формулами:

$$\rho_o^c = \rho^T \cdot (1 - 0,01 \cdot \varphi), \quad (2)$$

$$\rho_o^\phi = \rho^T (1 - \varphi \cdot (1 - \rho^\phi / \rho^T)), \quad (3)$$

де φ – коефіцієнт пористості, %; ρ^T , ρ_o^c , ρ^ϕ , ρ_o^ϕ , – об'ємна густина (у кг/м³) твердої компоненти породи, сухої породи, флюїду, двокомпонентного середовища відповідно.

Числові коефіцієнти для емпіричного співвідношення для β^ϕ отримано з урахуванням нелінійності зв'язку між стисливістю та тиском P за базою даних (тиск, пористість, стисливість) [Петкевич, 1965; Петрографический..., 1981] у вигляді

$$\beta_i^{*\phi} = 1,939 - 4,32 \cdot 10^{-3} \cdot P_i^* + 0,27 \cdot \varphi_i \cdot (P_i^*)^{-0,186}, \quad (4)$$

де φ_i – пористість i -го шару породи, $i = 1, 2, \dots, n$, * – ознака приведення значення параметра до безрозмірної величини поділом на відповідне одиничне.

Для кожного прошарку з розбиття розрізу обчислюється пластовий тиск, відповідний гідростатичному (глибині). Якщо, за даними буріння, на певних глибинах тиск перевищує гідростатичний, то вноситься відповідна поправка на тиск.

Відповідно, кожний i -й шар матиме своє значення тиску і стисливості.

Побудова емпіричного співвідношення для розрахунку модуля зсуву для флюїдонасичених порід μ^ϕ виконується аналогічно. Треба зауважити, що у випадках відсутності певної частини базових даних використовуємо інші дані, за якими визначасмо потрібні нам параметри.

Для розрахунку значень стисливості та модуля зсуву для сухих порід використано виведені теоретично співвідношення (5), (6) [Скакальська, 2013, 2014]:

$$\mu_{i+1}^c = 1 / \left[\frac{1}{\mu_i^c} - \frac{5 - \nu^T}{3} \cdot \frac{15(\mu_{i+1}^\phi - \mu_i^\phi) + 4\mu_i^\phi \mu_{i+1}^\phi (\beta_{i+1}^\phi - \beta_i^\phi)}{15\mu_i^\phi \mu_{i+1}^\phi} \right] \quad (5)$$

$$\mu_1^c = \frac{\rho_o^c \cdot \mu_1^\phi}{\rho_1^\phi}; \quad i = 1, 2, \dots, n - 1;$$

де ρ_1^ϕ – об'ємна густина першого шару флюїдонасиченої породи; ν^T – коефіцієнт Пуассона твердої фази породи; β_i^ϕ , β_{i-1}^ϕ – стисливості;

μ_i^ϕ , μ_{i+1}^ϕ – модулі зсуву i -го, $i-1$ -го та $i+1$ -го шару флюїдонасиченої породи.

$$\beta_{i-1}^c = \beta_i^c + \frac{15 \cdot (2 - \nu^T)}{4 \cdot (5 - \nu^T)} \cdot (1/\mu_{i-1}^c - 1/\mu_i^c); \quad (6)$$

$$\beta_n^c = \frac{3 \cdot \rho_o^\phi}{\rho_o^c \cdot (3/\beta_n^\phi + 4 \cdot \mu_n^\phi) - 4 \cdot \mu_n^c \cdot \rho_o^\phi}, \quad i = n, n - 1, \dots, 2.$$

Враховано, що збільшення тиску на тріщинуватому середовищі зменшує його нелінійність і під час навантаження близько 100 МПа практично усі мікротріщини закриваються. Цю властивість і властивості сухої породи за мінімального навантаження використано для розрахунку плоского модуля деформування, стисливості, коефіцієнта Пуассона та модуля зсуву твердої матриці породи.

Сформульовано умову, за допомогою якої можна відрізнити газонасичені породи від порід з рідиною (пластова вода, нафта). Для цього запропоновано функцію [Хекало, 2008], що дає мінімум по модулю між розрахованими швидкостями поширення поздовжньої хвилі в породі (за методикою) і пластовою (інтервальною) швидкістю такої хвилі (за даними каротажу):

$$\Phi = \min_{\varphi_{\min} \leq \varphi \leq \varphi_{\max}} \left\{ \left| V_p^c - V_p^{AK(CK)} \right|, \left| V_p^\phi - V_p^{AK(CK)} \right| \right\}$$

Точність обчислень з використанням формул (1)-(6) достатня для ефективного прогнозування типу флюїдонасичення порід-колекторів, що продемонстровано на наведених нижче прикладах аналізу даних конкретних свердловин.

Щоб отримати значення швидкостей для досліджень розрізів свердловин за даними гамма-каротажу, додатково побудовано кореляційні співвідношення для переходу від числових значень інтенсивності гамма-випромінювання до значень швидкості поздовжніх хвиль [Скакальська, Назаревич, 2015]. Для цього використано відомі співвідношення для визначення коефіцієнта глинистості глинистих шарів (за даними про інтенсивність гамма-випромінювання) з [Заворотько, 2010; Итенберг, 1982, 1987; Методика..., 2012]:

$$\varphi_{\text{гт}} = (48,54 \cdot \Delta I_g + 3,092) / 100, \quad (7)$$

коефіцієнта пористості за акустичним чи сейсмокаротажом [Гірничий..., 2004; Методика..., 2012]:

$$\varphi^{AK(CK)+ГК} = \varphi^{AK(CK)} + 0,204 \cdot (\varphi_{\text{гт}} - 0,07), \quad (8)$$

рівняння середнього часу для пористості

$$\varphi^{AK(CK)} = 100 \cdot (\Delta T_{\text{мт}} - \Delta T_{AK(CK)}) / (\Delta T_{\phi} - \Delta T_{AK(CK)}),$$

[Вербицкий Т. З., 1985; Методика..., 2012], що дає змогу врахувати ΔI_g – інтенсивність гамма-випромінювання в мкР/год, параметр, який приводимо до безрозмірної величини поділом на одиничну інтенсивність.

Вираз для обчислення інтервального часу матиме вигляд:

$$\Delta T_{AK(CK)+TK} = \frac{(\varphi^{AK(CK)} / 100 \cdot \Delta T_{\phi} - \Delta T)}{\varphi^{AK(CK)} / 100 - 1}, \quad (9)$$

де $\Delta T_{AK(CK)}$, ΔT_{ϕ} , ΔT – інтервальний час для акустичного чи сейсмокаротажу, для флюїду, для твердої фази; $\varphi^{AK(CK)}$ – коефіцієнт пористості (АК(СК)), %, який визначається за формулами (7), (8).

Для обчислення швидкостей поздовжніх хвиль отримуємо за методом найменших квадратів вираз:

$$Vp_i = 0,45 \cdot \ln I g_i \cdot 10^3 + 3,76 \cdot \varphi_i^{AK} \cdot 10^2. \quad (10)$$

Вираз перевірено на даних гамма-каротажу розрізів ряду свердловин.

Вибір числа досліджуваних інтервалів залежить від необхідної деталізації вивчення розрізу. У наведених нижче прикладах воно дорівнює числу відібраних значень інтервального часу або інтенсивності гамма-випромінювання для конкретної свердловини.

Ефективність методики перевірено на реальних даних, люб'язно наданих нам колегами [Куровець, 2010; Kurovets, 2012]. Під час цих досліджень методику застосовано до розрізів свердловин з породами різної літології: вапняковими, піщаниковими, глинистими.

Розроблену методику реалізовано на програмному забезпеченні, розробленому в середовищах Fortran і Excel.

Результати

Розроблену методику апробовано на даних свердловин ряду структур Західного нафтогазоносного регіону України [Крупський та ін., 2014; Куровець та ін., 2014] (Залужанської, Ліщинської, Бучачської, Лудинської) (рис. 1). [Скакальська, 2014; Скакальська Л.В., Назаревич А. В., 2014, 2015].

Для окремих свердловин виявлено не зафіксовані попередніми дослідженнями тонкі (від 0,1 м) прошарки з істотною пористістю і заповненням газом, водою, нафтою, а також прошарки з практично нульовою пористістю, які можуть слугувати екранами. Простежено зміни пружних (швидкостей пружних хвиль, модуля зсуву, стисливості, модуля об'ємного стиску, густини тощо) та колекторських (коефіцієнтів пористості) характеристик, наявних у розрізах досліджуваних свердловин порід (глин, мергелів, алевролітів, вапняків, пісковиків, сланцевих товщ) залежно від тиску (глибини) і відхилень між значеннями цих параметрів, отриманих за теоретичними та емпіричними залежностями. На основі цих даних спрогнозовано нафтогазоводонасиченість (коефіцієнт пористості та тип заповнювача пор) досліджених горизонтів розрізів. Простежено відмінності у пружних та колекторських характеристиках порід різного типу та геодинамічного генезису – теригенно-карбонатних (карбон, девон), карбонатних (девон, силур, кембрій), теригенних (девон, силур).

Результати прогнозування нафтогазоводонасиченості порід у розрізах досліджених свердловин добре узгоджуються з даними інших авторів ([Вишва, 2011; Крупський, 2001; Куровець, 2010; Літолого-петрофізичні..., 2010] та ін.).

Застосування методики до досліджень конкретних свердловин

Малопористі піщані колектори Волино-Поділья з ймовірною наявністю вуглеводнів розкрито тільки у середньому девоні та кембрії. Початкові пластові тиски у покладах дорівнюють або дещо вищі умовно гідростатичних. Буріння, що проводилось в останні десятиріччя на Волино-Поділлі (Лудинська площа, параметричні свердловини 1-Ліщинська, 3-Бучачська (рис. 1)), не принесло результатів і у 2005 році НАК "Нафтогаз України" прийняла рішення про припинення робіт через неможливість якісного розкриття продуктивних горизонтів з невисокими пластовими тисками та складно побудованими колекторами.

Аналіз частини результатів досліджень розрізів цих свердловин, успішно проведених за нашою прогноною методикою, наведено нижче.

Дослідження свердловини 3-Бучачська (4,4–2250,8 м)

Для проведення геофізичних досліджень Західно-Бучачської структури Стрийське ВБР пробурило параметричну свердловину 3-Бучачську глибиною 2250 м до архей-протерозойських відкладів.

Вивчалась будова та наявність покладів вуглеводнів у відкладах девону, силуру, кембрію та протерозою. Зібрано дані з літології та керну. Для кореляції досліджуваного розрізу використовувались дані раніше пробурених свердловин 1-, 2-Бучачська. Досліджувані пласти переважно виповнені щільними вапнистими пісковиками та алевролітами. Відклади силуру розкрито в інтервалі 770–1380 м. Виявлено глинисто-карбонатні породи, ущільнені глинистими вапняками та мергелевапнистими різновидами з пористістю $\phi = 4-8\%$.

На інтервалах глибин 386,0–448,4 м, 634,4–669,0 м вапнисті алевроліти, за даними досліджень, мають прошарки з газом, з усередненими значеннями пружних параметрів, поданими у табл. 1 та показаними на рис. 2. Ми спрогнозували характер флюїдонасичення порід вздовж розрізу св. 3-Бучачська і порівняли отримані результати з даними досліджень, проведених у ІПТГК НАН України (рис. 3).

Під час розрахунку параметрів уздовж всього розрізу свердловини виконується вибір інтервалів з певним типом флюїду до окремого файлу, а далі – числове і графічне представлення пружних параметрів, що описують стан розрізу свердловини на цих глибинах і при такому заповнювачі пор порід (див. рис. 3, а). Графіки для стисливості, модуля зсуву, густини, коефіцієнта Пуассона подано для прошарків, вибраних відповідно до даних інтервального часу вздовж усього розрізу свердловини. В окресленому еліпсом фрагменті показано поведінку і взаємкореляцію значень таких пружних параметрів:

- модуля Юнга (визначає породу у прошарку);
- модуля зсуву μ ;
- коефіцієнта Пуассона ν ;
- параметра стисливості β ;
- розрахованої за методикою пористості.

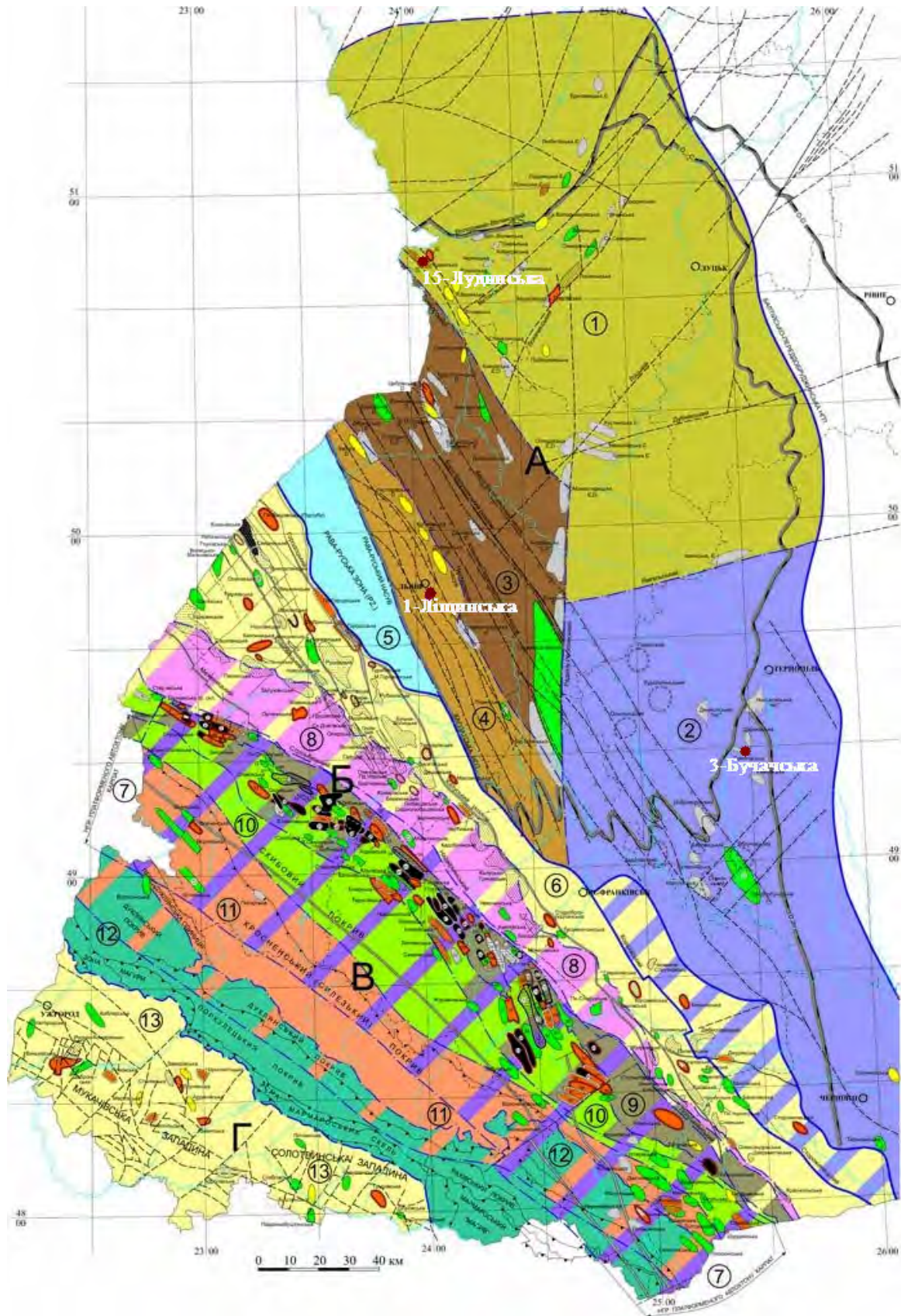


Рис. 1. Локалізація досліджених свердловин на карті-схемі тектоніки Західного нафтогазоносного регіону України [Гірничий..., 2004]

Fig. 1. Localization of the investigated wells on the tectonic map-chart of the Western oil-gas bearing region of Ukraine [Mining..., 2004].

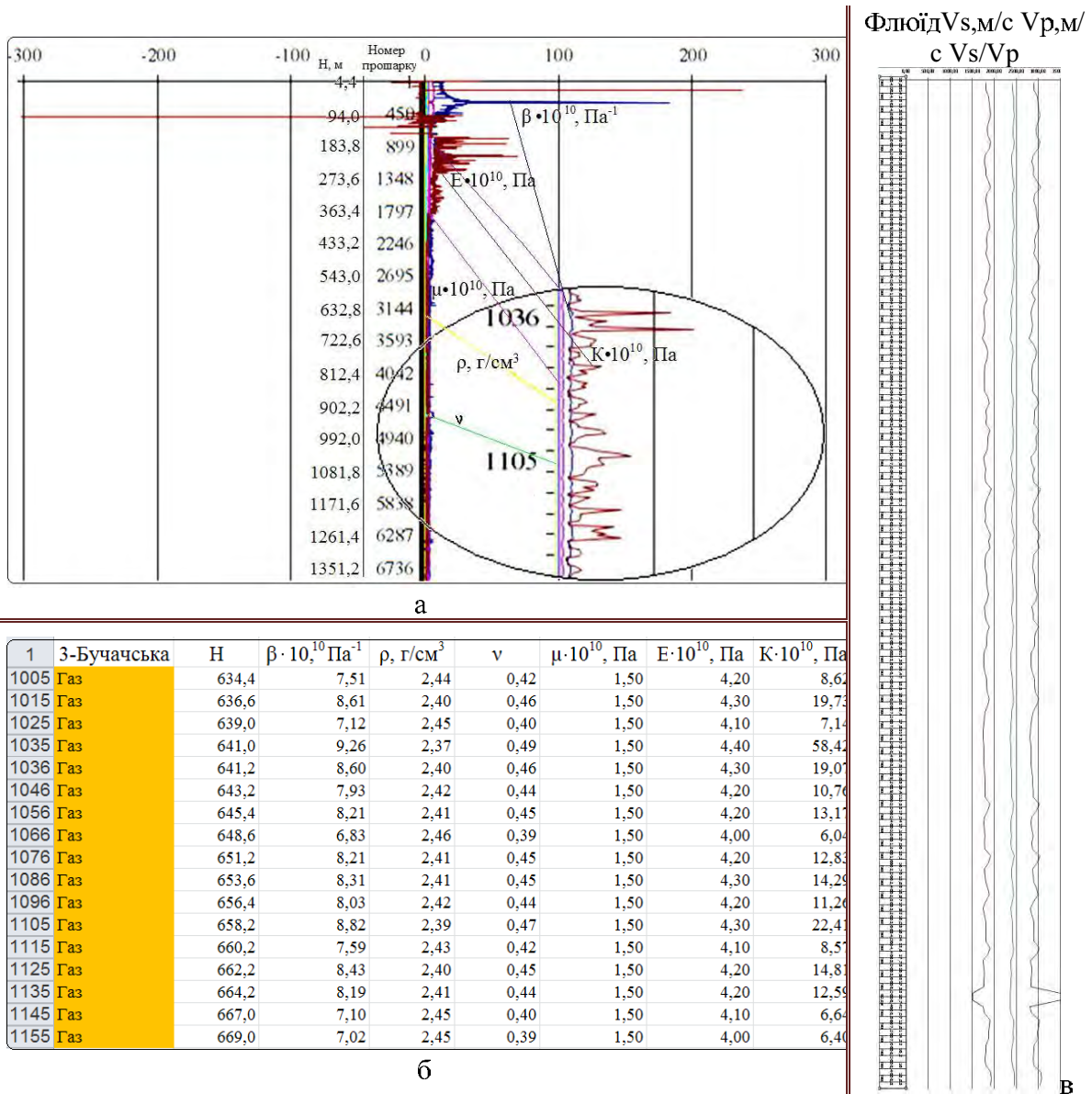


Рис. 2. Фрагмент розрахунків за прогнозною методикою для свердловини 3-Бучачська (за даними АК на інтервалі розрізу 634,4–669,0 м): значення пружних параметрів для про шарків з прогнозним наповнювачем пор – газом, (а), (б); прогноз газонасичення (в)

Fig. 2. A fragment of the calculations by the prediction methodology for the 3-Buchach'ska well (by the data of AL on the open-cast's interval of 634,4–669,0 m): the value of elastic parameters for the layers with the predicted pore filling with gas (a), (b); prognosis of gas saturation (v)

Таблиця 1 (Table 1)

Усереднені значення пружних параметрів газонасичених про шарків інтервалів 386,0–448,4 м, 634,4–669,0 м, 2020–2250 м розрізу свердловини 3-Бучачська

The average values of the elastic parameters of the gas-saturated layers of the open-cast's intervals of the 3-Buchach'ska well are 386,0–448,4 m, 634,4–669,0 m, 2020–2250 m

Інтервал, м	$\phi, \%$	$\rho, \text{кг/м}^3$	$V_p, \text{м/с}$	$V_s, \text{м/с}$	V_s/V_p	$P, \text{МПа}$
386,0–448,4	5,20	2592,53	3527,46	2228,33	0,63	3,95
634,4–669,0	15,08	2422,69	3049,69	1819,06	0,60	6,38
2020–2250	5,44	2586,86	4098,93	2580,40	0,63	20,93

Бучач 30-06-2013 загальний			Дослідження ІНТК НАН України			Дослідження автора			
NN	Вік	Інтервал	H	K _с K _к	Літологія	Надсичення	Інтервал	прогнозованого	флюїдонасичення
	м	м	м	% 0%			Вода	Газ	Нафта
1	D1	98,4	101,4	3	Валюк		6,2-6,4; 91,4-91,6; 91,2-92,0	4,4-6,2; 6,4-81,4; 91,6-93,2; 93,6-93,8;	
2	D1	107,4	110,6	3,2	Алевроліт		107,4-110,6;	112,8-115,0;	
3	D1	113,6	115,8	2,2	Валюк глиняний		113,6-115,6;	121,0-124,0; 132,8-124,0;	
4	D1	119,6	124	4,4	Валюк		119,6-121; 121,2-123,8; 124,0-124,2;	136,0-136,2; 138,2-138,4;	
5	D1	134,4	139,4	5	Валюк		134,4-136; 136,2-138,2; 138,4-139,6;	145,8-149,8; 147,8-148,2;	
6	D1	143,4	148	4,6	Валюк глиняний		143,4-145,6; 145,8-146,6; 146,8-147,8;	155,0-156,4; 160,0-162,2;	
7	D1	155	162	7	Валюк		155,0-156,2; 156,4-161,8;	184,8-183,0; 186,4-188,8;	
8	D1	184	188	4	Пісковик вапнякий		184,0-184,8; 185,0-186,4; 186,0-187,0; 187,2-187,4;	184,8-183,0; 186,4-188,8;	
9	D1	191,6	194,8	3,2	Пісковик вапнякий		191,6-193,6; 194,6-194,8;	184,8-183,0; 186,4-188,8;	
10	D1	203	207,2	4,2	Пісковик вапнякий		203,0-207,2;	184,8-183,0; 186,4-188,8;	
11	D1	214,8	216,4	1,6	Валюк		214,8-216,4;	184,8-183,0; 186,4-188,8;	
12	D1	222,2	227,2	5	Пісковик глиняний		222,2-223,6; 224,0-224,2; 224,4-224,6;	224,8-227,0; 228,0-224,0;	
13	D1	249,2	252,3	3,1	Пісковик вапнякий ущ.		249,2-251,8; 252,0-252,8; 253,0-253,4;	251,8-252,6; 252,8-253,6;	
14	D1	253,8	266,4	12,6	Пісковик вапнякий ущ. водонасичений		253,8-256,2; 256,6-258,6; 258,8-265,8;	266,0-266,6; 268,0-268,8;	
15	D1	276	278,4	2,4	Пісковик вапнякий ущ.		276,0-278,4;	268,0-268,8;	
16	D1	286,6	289,6	3	Пісковик вапнякий ущ.		286,6-287,4; 288,0-288,8; 289,4-289,6;	287,4-288,2;	
17	D1	300,2	303,6	3,4	Пісковик ущільнений		300,2-300,8; 301,0-301,2; 301,4-301,6;	301,0-301,4; 301,6-302,0;	
18	D1	305,8	307,2	1,4	Пісковик ущільнений		305,8-306,8; 307,0-307,4;	306,8-307,2;	
19	D1	325	327,2	2,2	Пісковик ущільнений		325,0-327,2;	306,8-307,2;	
20	D1	337,2	353,6	16,4	Пісковик глиняний водонасичений		337,2-339,2; 339,4-339,6; 340,0-340,8;	339,2-339,4; 339,6-340,0;	
21	D1	355,2	360	4,8	Пісковик глиняний		355,2-355,8; 356,0-356,4; 357,0-358,0;	357,0-358,0; 358,2-359,2;	
22	D1	362,2	367,6	5,4	Пісковик глиняний водонасичений		362,2-362,8; 363,0-363,8; 367,2-367,4;	362,8-363,6; 366,8-367,2;	
23	D1	373,4	375,8	2,4	Пісковик глиняний ущ.		373,4-374,0;	374,0-376,6;	
24	D1	380	382,8	2,8	Пісковик ущільнений		380,0-380,4; 381,8-382,0; 382,6-382,8;	380,4-381,8; 382,6-383,0;	
25	D1	389,2	412,2	23	Алевроліт ущ.		389,2-389,8; 392,4-393,4; 395,2-396,0;	389,2-389,8; 392,6-393,0;	
26	D1	418	427,2	9,2	Алевроліт ущ.		418,2-420,2; 421,2-422,0; 422,6-424,2;	418,0-422,8; 424,2-424,4;	
27	D1	514,2	519,6	5,4	Алевроліт вапнякий ущ. водонасичений		514,2-516,0; 516,2-519,8;	409,0-409,2;	
28	D1	540,4	545	4,6	Алевроліт вапнякий ущ. водонасичений		540,4-545,2;	516,0-516,2;	
29	D1	568,8	578,4	9,6	Алевроліт вапнякий ущ. водонасичений		568,8-578,6;		
30	D1	594	603	9	Алевроліт вапнякий		594,0-603,2;		
31	D1	614,2	622,8	8,6	Алевроліт вапнякий ущ. водонасичений		614,2-623,0;		
32	D1	689,6	726,8	37,2	Алевроліт вапнякий ущ. водонасичений		689,6-727,0;		

Рис. 3. Свердловина 3-Бучачська. Порівняння результатів досліджень за нашою методикою (справа, на жовтому фоні) з результатами попередніх досліджень, проведених іншими авторами (Л. М. Куровець та ін.) (зліва, на зеленому фоні) на інтервалі 57–770 м (девон) (справа позначено: числа синім кольором – прогнозні інтервали з водою, оранжевим – інтервали з газом; коричневим – з нафтопровами)

Fig. 3. The 3-Buchachs'ka well. Comparison of the research results by our methodology presented (on the right, on the yellow background) with those of the previous research conducted by other authors (Kurovets and others) (seen on the left, on the green background) on the interval of 57–770 m (Devonian) (on the right, numbers in the blue color are predicted intervals with water; numbers in orange are intervals with gas; in brown are those with oil)

На рис. 2, б подано фрагмент таблиці з розрахованими числовими величинами цих параметрів для інтервалу глибин 634,4–669,0 м.

Зазначимо, що розрахунок флюїдонасичення вздовж усього розрізу виконують за кожним з наявних у las-файлі вхідних значень інтервального часу, для свердловини 3-Бучачська – це з кроком за глибиною кожні двадцять сантиметрів (див. рис. 2, б).

У колонці зліва (рис. 2, б – сірий колір) – номер прошарку, в якому програма прогнозує газ, у наступній колонці – прогнозне повідомлення програми, що саме газ є заповнювачем пор породи. Третя колонка – реальна глибина відповідного прошарку. Наступні колонки – петрофізичні параметри порід прошарків (назви параметрів – у верхньому рядку фрагменту таблиці). На рис. 2, в графічно показано зміну швидкості поперечної (V_s , м/с) і поздовжньої (V_p , м/с) хвиль та параметра V_s/V_p для цього фрагменту розрізу. Ліва колонка цього графіка показує тип флюїду на кожній конкретній глибині.

У цьому інтервалі глибин виявлено 14 прошарків загальною товщиною 4,2 м зі заповнювачем пор – водою. Решта з загальної товщини інтервалу у 34,6 м – газонаповнені шари. Середня пористість по інтервалу – 15,08 %. Вище і нижче від представленого інтервалу (на глибинах 614,2–622,8 м і 689,6–726,8 м) породи у розрізі класифіковані як алевроліт вапнистий ущільнений, водонасичений, з пористістю за АК 6–10 % [Kurovets, 2012]. Середня пористість порід, визначена на цих інтервалах за нашою методикою – 10,16 %. Кореспондується між собою і розкид величин швидкостей. Отже, можна вважати результати наших розрахунків по інтервалу 634,4–669,0 м адекватними, про що свідчать також результати порівняння з даними інших авторів, зокрема, з ІТГК НАН України (див. рис. 3). Тут зазначимо, що завдяки детальному, покроковому за глибиною, розрахунку отримується максимально можливе детальне розчленування розрізу (відповідно до детальності вхідних даних АК), що дає змогу виявляти тонкі (товщиною від 0,1 м) нафтогазонасичені шари і прошарки. Це добре ілюструє саме рис. 3, де кожному з досліджених раніше шарів (представлених зліва) відповідає низці дрібних глибинних інтервалів (об'єднаних за подібними характеристиками порід), кожен з яких, своєю чергою, складається з пачки прорахованих прошарків одиначної (з кроком АК за глибиною) товщини.

Досліджено склад газів, що заповнюють поровий простір у розрізі цієї свердловини [Загнітко, 2014]. Виявлено водень, двоокис вуглецю, метан, азот, важкі вуглеводні, ймовірно, сланцевого та ендеогенного походження.

Дослідження свердловини 15-Лудинська (19,3–3230,5 м)

На сусідніх з Лудинською (див. рис. 1) ділянках на території Польщі у верхньому девоні зна-

йдено нафтові та газові поклади [Міжнародна..., 2013; Нойхаус, 2011]. За результатами ГДС у свердловині 1-Лудинська виділено пласти вапняків [Kurovets, 2012], оцінені як, можливо, газонасичені.

У розрізі свердловини 15-Лудинської колекторами для покладів вуглеводнів слугують пісковики з пористістю до 18 % і проникністю до 131×10^{-3} мкм² [Куровець, 2001, 2006; Гладун, 2014]. Родовище належить до прирозломних пас-ток антиклінального типу.

Розріз кембрію – це майже два кілометри прибережно-морських теригенних порід, перекритих аргіліто-алевролітовими породами ордовіку. Для кембрію характерні щільні пласти-колектори. Як показує швидкісний профіль по розрізу свердловини, вони чергуються з аргілітовими пачками потужністю від 10–15 м до 100 м [Звіт..., 2014].

За даними обчислень за нашою методикою трипшинувато-кавернозно-порові пустоти [Омельченко, 2013] інтервалів девону та силуру заповнені попеременно газом з перешаруванням з водою (див. рис. 4).

Розраховано і виділено в окремі файли пружні характеристики усіх прошарків з прогнозованим заповнювачем пор – водою, газом чи нафтопроявами.

Прогнозу наявність газу у шарах розрізу св. 15-Лудинська показано на рис. 4, а, б. (представлення даних тут і на рис. 5 аналогічне, як на рис. 2). Усереднені значення пружних параметрів подано у табл. 2.

Свердловина 15-Лудинська є однією з тих, на даних яких випробувано описаний вище варіант методики з використанням даних гамма-каротажу. Зокрема, за результатами досліджень за прогнозною методикою з урахуванням формул (7)–(10) у розрізі свердловини виявлено три, відносно непроники, прошарки на глибинах 1682,10 м; 1706,70 м; 2446,40 м. Їх можна вважати екранами для нижчих шарів. Розширені й уточнені результати щодо вивчення розрізу свердловини 15-Лудинська, отримані під час наших досліджень за прогнозною методикою, наведено у [Скальська, Назаревич, 2014, 2015].

Результати прогнозу за нашою методикою по свердловині 15-Лудинська підтверджує аналіз даних газового каротажу (див. рис. 4, в) [Крупський, 2001]. Він засвідчив наявність газоперспективних зон у сірих і чорних аргілітах, вапняках та червоноколірних пісковиках відкладів девону і верхнього силуру, аргілітах та алевролітах нижньої частини кембрію. Інтервалам з підвищеними газопроявами відповідають інтервали з підвищеними значеннями радіоактивності за гамма-каротажем (рис. 4, в).

Дослідження свердловини 1-Ліщинська (2020–3540 м)

По свердловині 1-Ліщинська вглиб по розрізу попеременно чергуються алевроліти та аргіліти з

прошарками вапняків, сланців, ущільненими пісковиками.

Вхідними були дані АК з похибкою у визначеннях інтервального часу (ΔT) до 1-2 мкс і

швидкості – до 2 % [Лещук, 1977]. Значення інтервального часу лежать у межах 148,35–353,33 мкс/м, швидкість поздовжніх хвиль – 2830,19–6741,57 м/с.

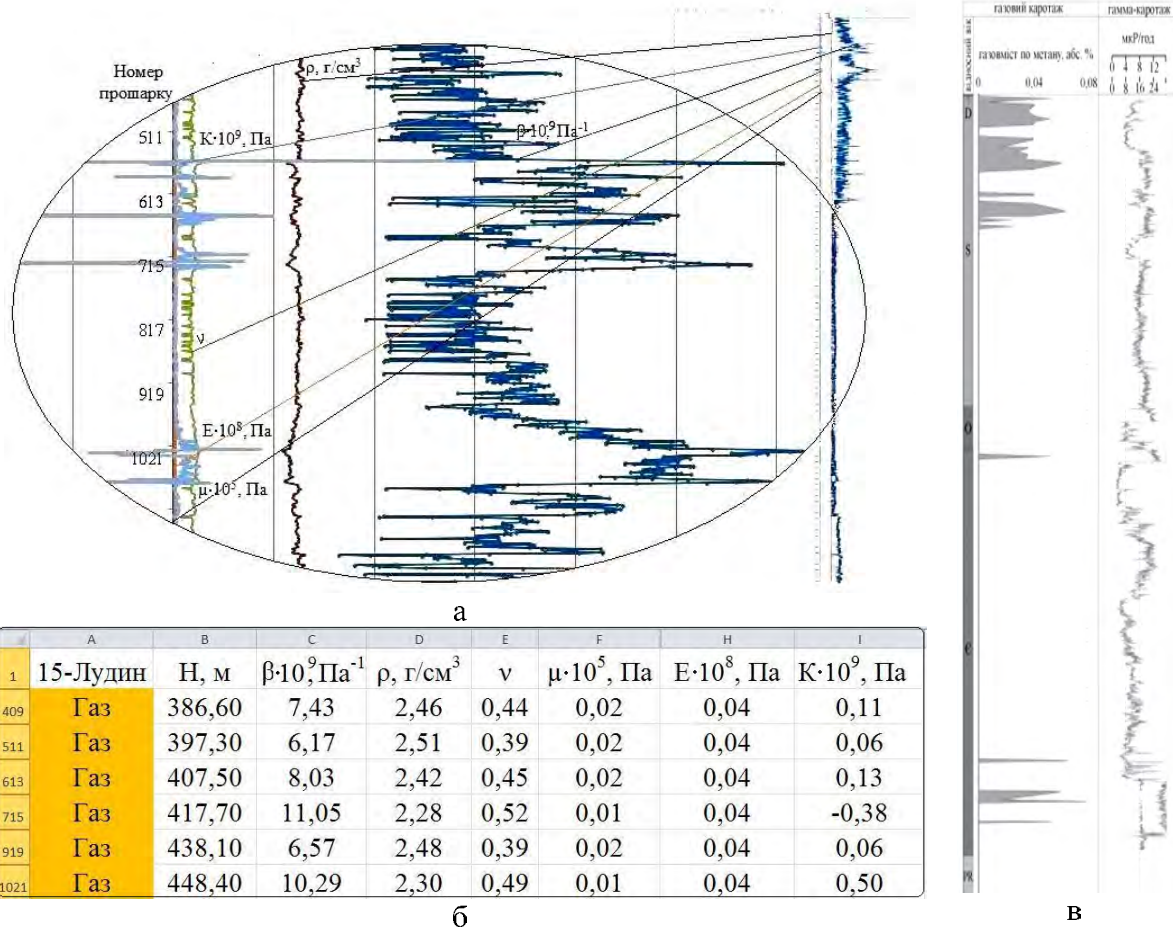


Рис. 4. Фрагмент розрахунків за прогнозною методикою для свердловини 15-Лудинська (за даними АК на інтервалі розрізу 386,6–448,40 м): значення пружних параметрів для прошарків з прогнозним наповнювачем пор – газом, (а), (б); зведені дані газового та гамма-каротажів по розрізу свердловини (за даними УкрНДІГаз) (в)
Fig. 4. A fragment of the calculations by the prediction methodology for the 15-Ludynska well (by the data of AL on the open-casts' interval of 386,6–448,4 m): the values of elastic parameters for layers with the predicted pore filling with gas (a), (b); generalized data of gas- and gamma-logging along the well's open-cast (on data of the Ukrainian Research Institute of Gas).

Таблиця 2 (Table 2)

Усереднені значення пружних параметрів газонасичених прошарків інтервалів 386,0–448,4 м, 634,4–669,0 м та 2020–3230 м розрізу свердловини 15-Лудинська
 The average values of the elastic parameters of gas-saturated layers of the intervals of 386,0–448,4 m, 634,4–669,0 m and 2020–3230 m of the 15-Ludynska well's open-cast

Інтервал, м	$\phi, \%$	$\rho, \text{кг/м}^3$	$V_p, \text{м/с}$	$V_s, \text{м/с}$	V_s/V_p	$P, \text{МПа}$
386,0–448,4	8,91	2528,82	3700,29	2453,53	0,66	4,22
634,4–669,0	8,90	2528,95	3415,1	2192,75	0,64	6,55
2020–2250	6,28	2574,04	3919,94	2621,65	0,67	21,26
2250–3230,5	9,57	2517,46	3909,32	2651,69	0,68	27,55

У результаті розрахунків за методикою отримано такі характеристики порід у розрізі свердловини 1-Ліщинська (середні розраховані значення): пористості – 2,14 %; об'ємної густини – 2621,11 кг/м³ (усереднені по інтервалах глибин пружні параметри див. у табл. 3).

Результати розрахунків (фрагмент розрізу) показано на рис. 5. Інтервал 2020-2250 м оцінками за методикою визначено як малопродуктивний. Приблизно з середини інтервалу пористість зростає (з 1,5 % до 6–7 %), що свідчить про наявність колекторів. Розрахунки підтверджують зміну непрониких шарів газонасиченими і прогнозують

наявність газонасиченого інтервалу на глибинах 2500–3540 м з пористістю 6–10 %. Тут виділено 57 прошарків товщиною від 1 до 25 м, заповнених газом (див. фрагмент даних та результатів розрахунків на рис. 5); 10 прошарків, товщиною від 2 до 15 м, з прогнозним наповнювачем пор – водою. Наявні прошарки з практично нульовою пористістю – екрани.

Аналіз результатів

Порівнюючи між собою числові дані конкретних параметрів порід різних свердловин (табл. 1–3), можна відзначити низку особливостей.

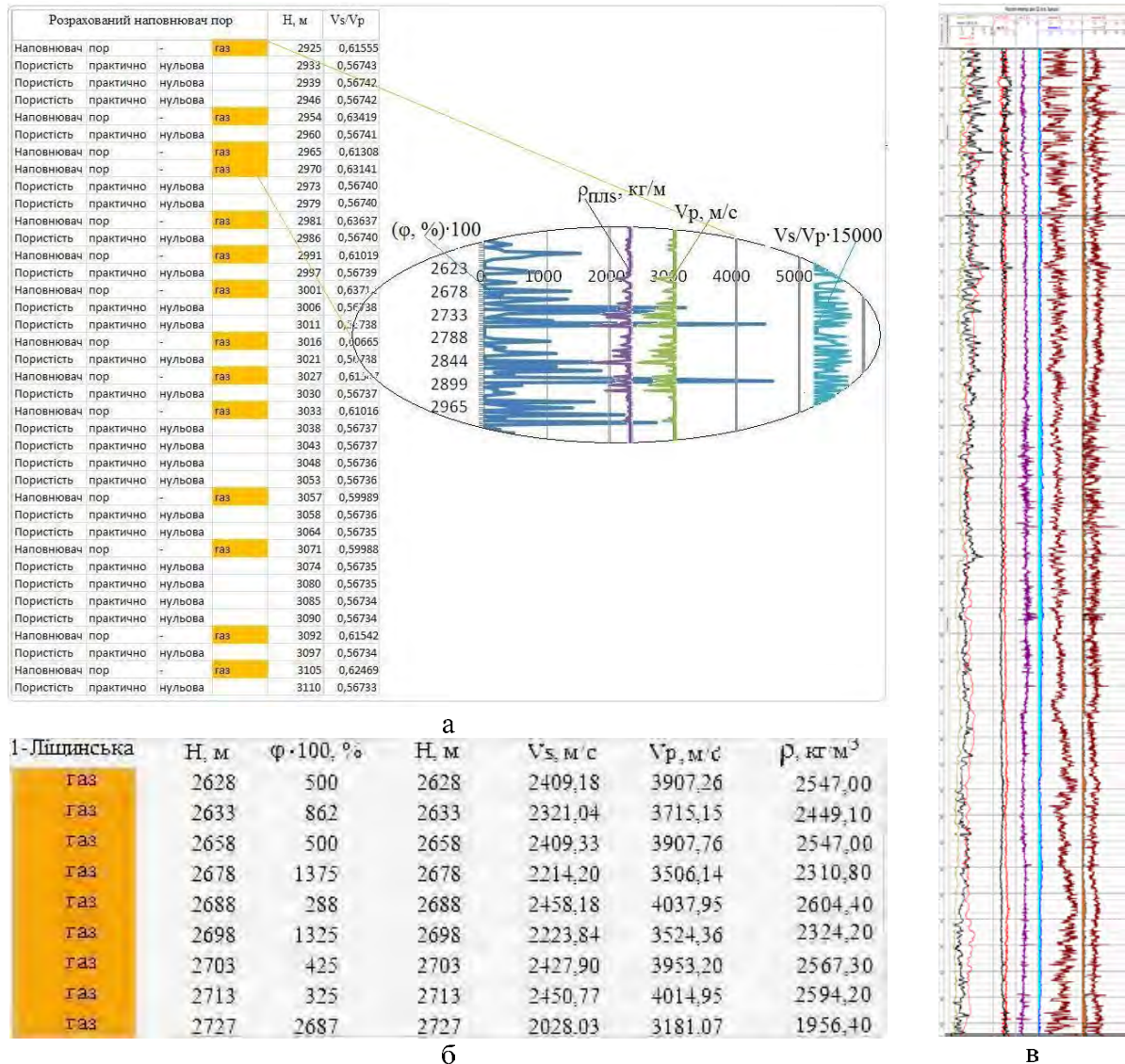


Рис. 5. Фрагмент розрахунків за прогнозною методикою для свердловини 1-Ліщинська (за даними АК на інтервалі розрізу 2628–2687 м): значення пружних параметрів для прошарків з прогнозним наповнювачем пор – газом, (а), (б); результати геофізичних досліджень розрізу свердловини [Куровець та ін., 2010] (в)

Fig. 5. A fragment of the calculations by the prediction methodology for the 1-Lishchyn'ska well (by the data of AL on the open-cast interval of 2628–2687 m): The values of the elastic parameters for layers with the predicted pore' filling with gas (a), (б); results of the geophysical research of well's open-cast [Kurovets' and others, 2010] (в)

Таблиця 3 (Table 3)

Усереднені значення пружних параметрів прошарків інтервалів розрізу свердловини 1-Ліщинська
The average values of the open-cast of the 1-Lishchyns'ka well's elastic parameters

Інтервал, м	ϕ , %	ρ , кг/м ³	V_p , м/с	V_s , м/с	V_s/V_p	P , МПа
2020–2250 (з газом)	1,5	2641,50	4054,05	2435,41	0,60	
2020–2250 (загальний)	0,16	2677,05	4621,18	2646,8	0,57	21,40
2250–3230,5 (з газом)	7,49	2461,48	3736,33	2294,73	0,62	
2250–3230,5 (загальний)	2,85	2603,15	4308,78	2515,58	0,59	27,49
3230,5–3540 (з газом)	4,85	2499,73	3795,21	2331,49	0,61	
3230,5–3540 (загальний)	1,48	2634,17	4487,02	2588,75	0,58	33,95
2020–3540 (з газом)	6,76	2472,86	3754,89	2306,87	0,61	
2020–3540 (загальний)	2,19	2677,24	4396,54	2560,19	0,57	27,90

Так, для свердловини 3-Бучачька (табл. 1) притомно є значно підвищена (15,08 % для інтервалу 634–669 м, порівняно з 5,20 % для інтервалу 386–448 м і 5,44 % для інтервалу 2020–2250 м) пористість. Густина для верхнього і нижнього інтервалів, практично, однакові (2592,53 і 2586,86 кг/м³ відповідно), а для середнього густина помітно менша (2422,69 кг/м³). Водночас за швидкостями картина інша – якщо для верхнього і середнього інтервалів зміна V_p , принаймні на якісному рівні, корелює із змінами пористості та густини, то для нижнього (незважаючи на, практично, однакові з верхнім значення ϕ і ρ) V_p є на 571,47 м/с (на 14 %) більша. Це однозначно свідчить про різну літологію і пружні властивості порід на цих інтервалах розрізів.

Також відзначимо, що для інтервалу 386–448 м для свердловин 3-Бучачька і 15-Лудинська (див. табл. 1 і 2) значення густин є досить близькими (2592,53 і 2528,82 г/м³ відповідно), різниця становить 63,71 кг/м³ або 2,47 %. Зате пористості (5,20 % і 8,91 %) помітно відрізняються, різниця становить 3,71 %. Отже, породи мають суттєво різні характеристики скелету (адже, якщо припустити, що породи однакові, а різниця викликана тільки змінами пористості, то тоді густина порід мала б становити 1717,25 кг/м³). Швидкості Р-хвиль для цих інтервалів мають значення 3527,46 м/с і 3700,29 м/с. Вони відрізняються між собою на 4,67 %. Така непропорційність між густинами, пористістю та швидкостями свідчить про вплив на ці параметри ще інших характеристик порід, зокрема, параметрів скелету породи, параметрів порового простору, типу заповнювача пор та ін., і ці характеристики є різними для порід досліджуваних інтервалів.

Аналізуючи дані по свердловині 1-Ліщинська (табл. 3), слід зазначити, що загалом, на якісному рівні, дані про пористість, густина і газонасиченість порід розрізу досить добре корелюють між собою – газонасні інтервали і прошарки є суттєво (у 3–10 разів) більш пористими і з помітно меншою (на 35–205 кг/м³) густиною. Також вони відрізняються на 567–692 м/с меншими швидкостями V_p . Це свідчить про відносну однорідність порід у цих інтервалах розрізу, принаймні, за пружними характеристиками.

З наведеного можна зробити висновок, що результати застосування розробленої методики до аналізу пружних характеристик порід у розрізах свердловин дають багато цікавих і важливих петрофізичних даних, поглиблений аналіз і узагальнення яких потребує окремого детального розгляду.

Узагальнюючи наведені результати застосування розробленої прогнозувальної методики до обробки даних по свердловинах 3-Бучачька, 1-Ліщинська та 15-Лудинська (рис. 2-5, табл. 1–3), бачимо, що розроблена прогнозна методика є ефективною для дослідження розрізів свердловин різних нафтогазоперспективних структур з різними типами порід (отже, з різним їх геодинамічним генезисом), різними глибинами їх залягання (отже, з різним діючим геостатичним та флюїдним тиском), з різною пористістю.

Наукова новизна

Новизною дослідження є методичні підходи до математичного моделювання порід-колекторів як пористої пружного геофізичного середовища і прогнозування їх нафтогазоводоносності з використанням у теоретичних розрахунках параметра стисливості порід та емпіричних кореляційних співвідношень між пружними параметрами, пористістю та флюїдонасиченістю порід за даними АК і ГК. Новими є самі емпіричні кореляційні співвідношення, що пов'язують ефективний тиск, пористість і стисливість для сухої та насиченої рідиною породи. Вони придатні для дослідження геологічних розрізів конкретних свердловин, для порід різного типу та геодинамічного генезису. Новими є результати пошарового (з максимально детальним, відповідним до вхідних даних, кроком за глибиною) розрахунку усіх пружних параметрів – важливих геофізичних характеристик порід досліджуваних розрізів. На основі цього у розрізах ряду свердловин вперше спрогнозовано тонкі нафто-, водо- та газонасичені шари і прошарки, що також є новим результатом. За розрахунками відстежуються зони низьких швидкостей, шари низької та високої пористості – покритишки і колектори. Новим є також розроблений варіант методики з використанням кореляційних співвідношень і даних гамма-каротажу.

Практична значущість

Методика забезпечує надійне прогнозування фізичних характеристик і нафтогазоводонасиченості пластів порід різної товщини (включаючи тонкі пласти – від 0,1–0,2 м) у розрізах свердловин: коефіцієнта пористості, пружних модулів, виявлення за даними АК (СК, ГК) типу флюїдонасичення, виявлення пасток неструктурного типу.

Побудовані вирази для обчислення коефіцієнтів до відповідних емпіричних співвідношень між пружними та колекторськими характеристиками порід, справедливі для довільного геологічного регіону з наявною параметричною базою даних і можуть ефективно використовуватись для досліджень розрізів місцевих свердловин.

Можливе застосування результатів досліджень у сейсмозвідці, інженерній геології та геофізиці.

Висновки

Теоретичні дослідження фізичних і колекторських властивостей гірських порід та проведений аналіз експериментальних даних АК і ГК дали змогу створити ефективну методику прогнозування нафтогазоводонасиченості порід у розрізах свердловин. У межах цих досліджень отримано такі основні науково-практичні результати:

1. Побудовано співвідношення між пружними параметрами порід для визначення ефективних модулів пружності та швидкостей поширення поздовжніх і поперечних хвиль (з урахуванням змін тиску і пористості) у сухій породі через пружні параметри породи, насиченої рідиною.

2. Запропоновано спосіб отримання емпіричних залежностей між фізичними і колекторськими властивостями породи довільного геологічного регіону. За експериментальними даними і з використанням методу найменших квадратів отримано емпіричні співвідношення, що функціонально пов'язують ефективний тиск, відкриту пористість і стисливість для сухої та насиченої рідиною породи [Методико-програмний..., 2014].

3. З використанням отриманих співвідношень розроблено методику прогнозування нафтогазоводонасиченості порід у розрізах свердловин за даними АК чи СК, в основу якої покладено теоретико-емпіричні залежності між пружними і колекторськими параметрами гірської породи. Методика забезпечує об'єктивну геологічну інтерпретацію даних геофізичних досліджень свердловин з виділенням продуктивних пластів у досліджуваному геологічному розрізі та прогнозування наявності у них нафти чи газу, даючи можливість виявляти накопичення вуглеводнів у шарах розрізу, зокрема в пастках неструктурного типу.

4. Розроблену методику апробовано на даних ряду свердловин Західного нафтогазоносного регіону України. Для цього використано наявну, необхідну для розрахунків параметричну базу даних. Отримані результати прогнозування нафтогазово-

донасичення за методикою узгоджуються з даними інших дослідників по відповідних розрізах.

5. Розроблено та апробовано на свердловинних даних варіант методики прогнозування нафтогазоводонасиченості порід у розрізах свердловин з використанням кореляційних співвідношень і даних гамма-каротажу.

6. З застосуванням розробленої методики отримано детальну й об'єктивну параметричну характеристику розрізів досліджених свердловин для кожного з опрацьованих інтервалів глибин зокрема з невизначеним раніше характером насичення. Простежено відмінності у пружних та колекторських характеристиках порід різного типу та геодинамічного генезису.

7. Створено алгоритм та програмне забезпечення для реалізації розробленої методики у середовищах ФОРТРАН та Excel, зокрема для числового дослідження пружних та динамічних характеристик порід (макроскопічних ефективних швидкостей і коефіцієнтів загасання хвиль). Проведено апробацію програмного забезпечення на обробці даних по сланцевих, вапнякових і пісковикових породах [Методико-програмний..., 2014].

Результати апробації підтверджують, що детальні геофізичні розрахунки комплексу пружних параметрів і прогнозування флюїдонасичення розрізів за розробленою методикою можуть використовуватись для дослідження розрізів будь-яких свердловин. Це, своєю чергою, може слугувати допомогою для проведення уточненого підрахунку вуглеводневих запасів.

Результати досліджень можна також використовувати у сейсмозвідці для уточненого задання сейсмооптичних характеристик розрізу.

Визначені пружні характеристики та флюїдонасиченість порід у розрізах свердловин доцільно також враховувати у гідрогеологічних та гідрогеокологічних дослідженнях, зокрема для прогнозування можливої активізації різних небезпечних гідрогеологічних (забруднення підземних вод, підтоплення) та геологічних (просідання земної поверхні, наведена сейсмічність) процесів під час нафтогазовидобутку і для оцінок можливих геокологічних ризиків при таких роботах [Назаревич, 2013; Keranen et al., 2013]. Особливо це стосується розробки сланцевих вуглеводневих покладів методом фрекінгу (гідророзриву пластів).

Загалом можна констатувати, що результати наведених досліджень даних по свердловинах різних нафтогазоносних структур Західного нафтогазоносного регіону України щодо виявлення шарів з газом і нафтою з використанням прогнозованої методики та розробленого програмного забезпечення підтверджують їх ефективність, зокрема щодо створення схеми надійного прогнозування колекторських властивостей і нафтогазоносності порід, за даними сейсмоакустичного каротажу, для підвищення ефективності нафтогазопощукових робіт.

Література

- Вербицкий Т. З. Математическое моделирование в сейсморазведке / Т. З. Вербицкий, Р. С. Починайко, Ю. П. Стародуб, О. С. Федоришин. – К. : Наук. думка, 1985. – 276 с.
- Вербицкий Т. З. Физическая природа нелинейной упругости геологических сред с фазовыми микронеоднородностями и особенности распространения в них упругих волн / Т. З. Вербицкий // Геофиз. сб. АН УССР. – К., 1977. – Вып. 75. – С. 16–24.
- Вербицкий Т.З. Нелінійна пружність гірських порід – основа вивчення фізико-механічного стану земної кори та флюїдонасичення пластів / Т. З. Вербицкий // Праці НТШ. Геофізика. – 2002. –Т. VIII. – С. 99–109.
- Вижва С. А. Прогноз продуктивності складно побудованих порід-колекторів нафти і газу за результатами інверсії даних ГДС / С. А. Вижва, І. М. Безродна // Геодинаміка. – 2011. – № 2(11). – С. 41–43.
- Вижва С. А. Петрофізичні дослідження як основа для розробки моделі структури пустотного простору складнопобудованих карбонатних порід-колекторів / С. А. Вижва, Г. Т. Продайвода, І. М. Безродна // Перспективи напрошування та збереження енергетичних ресурсів України : зб. наук. пр. – Івано-Франківськ : Факел, 2006. – С. 110-121.
- Гірничий енциклопедичний словник : у 3 т. / за ред. В. С. Білецького. – Донецьк : Східний видавничий дім, 2004. – Т. 3. – 752 с.
- Заворотько Ю. М. Фізичні основи геофізичних методів дослідження свердловин / Ю. М. Заворотько. – К. : УкрДГРІ, 2010. – 338 с.
- Загнітко В. Геохімічні особливості газової складової газонасичених сланцевих товщ України / В. Загнітко, В. Михайлов // Вісник КНУ ім. Т. Шевченка. – 2014. – Вып. 1. – С. 11–18.
- Итенберг С. С. Интерпретация результатов геофизических исследований скважин / С. С. Итенберг. – М. : Недра, 1987. – 375 с.
- Итенберг С.С. Геофизические исследования в скважинах / С. С. Итенберг. – М. : Недра, 1982. – 351 с.
- Красножон М. Д. Комплексна інтерпретація даних геофізичних досліджень свердловин і сейсморозвідки з використанням технології “Геопшук” / М. Д. Красножон, В. О. Ручко, К. О. Ручко // Збірник наукових праць УкрДГРІ. – 2013. – № 4. – С. 104–111.
- Крупський Ю. З. Геодинамічні умови формування і нафтогазонасиченість Карпатського та Волино-Подільського регіонів України / Ю. З. Крупський. – К. : УкрДГРІ, 2001. – 144 с.
- Крупський Ю. З. Нетрадиційні джерела вуглеводнів України : монографія : у 8 кн. Кн. 2. Західний нафтогазонасичений регіон / Ю. З. Крупський, І. М. Куровець, Ю. М. Сеньковський, В. А. Михайлов, П. М. Чепіль, Д. М. Дригант, В. Є. Шлапінський, Ю. В. Колтун, В. П. Чепіль, С. С. Куровець, В. П. Боллак. – К. : Ніка-Центр, 2014. – 400 с.
- Куровець І. М. Геолого-петрофізична характеристика басейнових дрібнозернистих порід ситуру південно-західної окраїни Східно-Європейської платформи / І. М. Куровець, Д. М. Дригант, П. М. Чепіль // Зб. наук. пр. ІГН НАН України. – 2010. – Вып. 3. – С. 279–285.
- Куровець І. М. Нетрадиційні джерела вуглеводнів України : монографія. у 8 кн. Кн. 1. Нетрадиційні джерела вуглеводнів : огляд проблеми / І. М. Куровець, В. А. Михайлов, О. Ю. Зейкан, Ю. З. Крупський, В. В. Гладун, П. М. Чепіль, В. М. Гулій, С. С. Куровець, С. В. Касянчук, І. І. Грищик, І. М. Наумко. – К. : Ніка-Центр, 2014. – 208 с.
- Куровець І. Геолого-петрофізичні аспекти пошуків колекторів вуглеводнів у рифових відкладах Львівського палеозойського прогину / І. Куровець, О. Шеремета, П. Чепусенко, А. Шира // Проблеми геології та нафтогазонасиченості Карпат : Тези доп. Міжнар. наук. конф. до 100-річчя від дня народження члена-кореспондента УРСР М.Р. Ладиженського та 55-річчя Інституту геології і геохімії горючих копалин НАН України. – Львів : ТзОВ “ПРОМАН” – “Прес-Експрес-Львів”. – 2006. – С. 121–123.
- Лешук В. В. Геоакустическое исследование околоскважинной среды / В. В. Лешук. – К. : Наук. думка, 1977. – 156 с.
- Літолого-петрофізичні і мінералофлюїдологічні властивості відкладів ситуру Львівського палеозойського прогину / І. Куровець, І. Наумко, Г. Притулка та ін. // Тези доп. наук. конф., присвяченої 65-річчю геологічного факультету ЛНУ імені Івана Франка “Стан і перспективи сучасної геологічної освіти та науки”, Львів, 13–15 жовтня 2010 р. – Львів : ВЦ ЛНУ імені Івана Франка, 2010. – С. 115–117.
- Методика та апаратура петрофізичних досліджень. Петрофізичні дослідження осадових порід // Альманах сучасної науки і образования (Публикация научных статей) / К. : gramota.net. – 2012. – <http://www.gramota.net/>.
- Методико-програмний комплекс для сейсмоакустичної розвідки сланцевих газів на основі адекватних моделей структурної механіки : звіт про НДР за проектом № 5726-2 УНТЦ / ППММ НАНУ; кер. В. В. Михаськів; виконала Л. В. Скакальська [та ін.]. – Львів, 2014. – 121 с. – № 0113U000717.
- Міжнародна конференція у Варшаві “Shale Gas as a Bridge Energy Carrier from Fossil Fuels to Green Energy” 14 листопада 2013 geo.gov.ua/...u...shale-gas-as-a-bridge...carrier...fuels...
- Назаревич Л. Є. Сейсмічність Олеської площі : екологічні аспекти / Л. Є. Назаревич // Геодинаміка. – 2013. – № 2(15). – С. 250–252.

- Нойхаус Д. Перспективи нетрадиційного газу в Україні та у світі / Д. Нойхаус // Центр Разумкова : Національна безпека і оборона. – 2011. – № 9. – С. 63.
- Омельченко В. Г. Перспективи нафтогазоносності силурійських відкладів Волино-Подільської нафтогазоносною області / В. Г. Омельченко, Ю. О. Янкевич, Т. В. Каліній // Івано-Франківськ : ІФНТУНГ. – 2013. – 11 с.
- Продайвода Г. Т. Метод визначення фільтраційно-емнісних властивостей складно-побудованих порід-колекторів за даними комплексних геофізичних і гідродинамічних методів дослідження свердловин / Г. Т. Продайвода, С. А. Вижва, І. М. Безродна, Т. Г. Продайвода // Матеріали Всеукраїнської конференції “Моніторинг небезп. геол. проц. та еколог. стану сер”. – Київ, 2006. – С. 55-56.
- Петкевич Г. И. Исследование упругих свойств пористых геологических сред, содержащих жидкости / Г. И. Петкевич, Т. З. Вербицкий. – К. : Наук. Думка, 1965. – 76 с.
- Петкевич Г. И. Методика петрофизического изучения коллекторов нефти и газа в условиях, моделирующих пластовые / Г. И. Петкевич, О. В. Шеремета, Г. И. Пригулко. – К. : Наук. думка, 1979. – 128 с.
- Петкевич Г. И. Акустические исследования горных пород в нефтяных скважинах / Г. И. Петкевич, Т. З. Вербицкий. – К. : Наук. думка, 1970. – 126 с.
- Петрографический словарь / Под ред. В. П. Петрова, О. А. Богатикова, Р. П. Петрова. – М. : Недра, 1981. – 496 с.
- Скакальська Л. В. Прогнозирование физических и коллекторских свойств пород-коллекторов для поиска нетрадиционного газа / Л. В. Скакальська // Баку : Научные труды. – 2014 (а). – № 1. – С. 4-10.
- Скакальська Л. В. Прогнозування фізичних та колекторських властивостей порід-колекторів у геологічних структурах із нетрадиційним газом / Л. В. Скакальська // Геодинаміка. – 2013. – № 15. – С. 329–331.
- Скакальська Л. В. Прогнозування флюїдонасичення порід-колекторів за даними гамма-каротажу / Л. В. Скакальська, А. В. Назаревич // Матер. XII Міжнар. конф. “Геоінформатика : теоретичні та прикладні аспекти”, 12–15 травня 2015 року, м. Київ. – Київ. – 2015 (CD).
- Скакальська Л. В. Методика прогнозування петрофизических характеристик и водонефтегазоносности разреза (на примере данных скважины 3-Бучачская, Украина) / Л. В. Скакальська, А. В. Назаревич. – Екатеринбург : Межотраслевой институт “Наука и образование”. – 2014. – № 5. – С. 25–29.
- Скакальська Л. В. Прогнозування фізичних та колекторських властивостей порід-колекторів у геологічних структурах із нетрадиційним газом / Л. В. Скакальська // Вісник КНУ ім. Тараса Шевченка. Геологія. – 2014 (б). – Вип. 1. – С. 35–40.
- Хекало П. И. Прогнозування фізичних і колекторських властивостей гірських порід за теоретико-емпіричними залежностями / П. И. Хекало // Геофіз. журн. – 2008. – 30, № 6. – С. 151–160.
- Keranen K. M. Potentially induced earthquakes in Oklahama, USA : Links between wastewater injection and the 2011 Mw 5.7 earthquake sequence / K. M. Keranen, H. M. Savage, G. A. Abers and E. S. Cochran // Geology. – 2013. – Vol. 41. – P. 699–702.
- Kurovets I. Geological and physical-chemical characteristics of lower Paleozoic deposits of Volynopodillya, Western Ukraine / I. Kurovets, D. Drygant, I. Naumko et al. // Biuletyn Państwowego Instytutu Geologicznego. – 2012. – 449. – P. 119–130.
- Poprawa P. Potencjał występowania złóż gazu ziemnego w łupkach dolnego paleozoiku w basenie Bałtyckim i Lubelsko-Podlaskim / P. Poprawa // Przegląd Geologiczny. – 2010. – T. 58, No 3. – S. 226–249.
- Poprawa P. Shale gas hydrocarbon system. – North American experience and European potential / P. Poprawa // Przegląd Geologiczny. – 2010. – T. 58, No 3. – S. 216–225.
- Zhen Yu. High Resolution Method for Fluid Prediction Based on Geostatistical Inversion / Yu. Zhen, HeA. Jing // International Journal of Geophysics, Volume 2013, Article ID 845646,7 pages, <http://dx.doi.org/10.1155/2013/845646>

Л. В. СКАКАЛЬСЬКА, А. В. НАЗАРЕВИЧ

Карпатское отделение Института геофизики НАН Украины им. С.И. Субботина, ул. Научная, 3б, Львов, Украина, 79060, тел. +38(032)2648563, эл. почта: Skakalska.sbighp@gmail.com, nazarevych-a@cb-igph.lviv.ua

ПРОГНОЗИРОВАНИЕ НЕФТЕГАЗОВОДОНАСЫЩЕННОСТИ ПОРОД РАЗНОЙ ЛИТОЛОГИИ И ГЕОДИНАМИЧЕСКОГО ГЕНЕЗИСА В РАЗРЕЗЕ СКВАЖИН

Цель. Цель работы – разработка методики прогнозирования нефтегазоводонасыщения пород в разрезе скважин по данным акустического (сейсмического) каротажа (АК, СК) и керновых исследований (КД) и апробация ее для исследования геологических разрезов с породами разной литологии и геодинамического генезиса. **Методика.** Основой методики являются теоретически установленные

соотношения между упругими параметрами пород, учитывающие влияние давления (глубины), пористости, нелинейной упругости с учетом структурных и рассеивающих особенностей горных пород (слоистость, микропористость). С использованием параметрической базы данных для пород-коллекторов конкретных территорий и геологических структур строятся эмпирические зависимости между физическими и коллекторскими свойствами породы. Сравнением результатов вычисления скоростей по теоретическим и эмпирическим зависимостям с фактическими данными каротажа прогнозируется тип заполнителя пор. Для случаев отсутствия данных АК (СК) для скважин или отдельных интервалов их разрезов разработан вариант методики с установлением и использованием корреляционных соотношений и данных гамма каротажа (ГК). Программное обеспечение для реализации методики разработано в среде Fortran и Excel. **Результаты.** Разработанная методика апробирована на данных скважин ряда структур Западного нефтегазоносного региона Украины (Залужанской, Лишинской, Бучачской, Лудинской). Для отдельных скважин выявлены не зафиксированные предыдущими исследованиями тонкие (от 0,1 м) прослойки с существенной пористостью и заполнением газом, водой, нефтью, а также прослойки с практически нулевой пористостью, которые могут служить экранами. Прослежены изменения упругих (скоростей упругих волн, сдвига, сжимаемости, объемного сжатия, плотности и т.п.) и коллекторских (пористости) характеристик имеющихся в разрезах исследуемых скважин пород (глин, мергелей, алевролитов, известняков, песчаников, сланцевых толщ) в зависимости от давления (глубины). По этим данным спрогнозировано нефтегазоводонасыщение (пористость и тип заполнителя пор) исследованных горизонтов разрезов. Прослежены отличия в упругих и коллекторских характеристиках пород разного возраста, типа и геодинамического генезиса – терригенно-карбонатных (карбон, девон), карбонатных (девон, силур, кембрий), терригенных (девон, силур). **Научная новизна.** Новизной этого исследования являются методические подходы с использованием в теоретических расчетах параметра сжимаемости пород и эмпирических корреляционных соотношений по данным АК и ГК. Новыми являются сами эмпирические корреляционные соотношения, связывающие эффективное давление, пористость и сжимаемость для сухой и насыщенной жидкостью породы для геологических разрезов конкретных скважин, для пород разного типа и геодинамического генезиса. Также новым результатом являются впервые спрогнозированные в разрезах ряда скважин тонкие нефте-водо-газонасыщенные слои и прослойки. По расчетам также отслеживаются зоны низких скоростей. **Практическая значимость.** Методика обеспечивает надежное прогнозирование физических характеристик и нефтегазоводонасыщения пластов пород разной толщины (включая тонкие пласты – от 0,1-0,2 м) в разрезе скважин: коэффициента пористости, упругих модулей, выявления по данным АК (СК, ГК) типа флюидонасыщения, выявление ловушек неструктурного типа. Построены выражения для вычисления коэффициентов к соответствующим эмпирическим соотношениям, справедливым для любого геологического региона с имеющейся параметрической базой данных.

Ключевые слова: математическое прогнозирование; нефтегазоводонасыщенность пород; акустический каротаж; гамма каротаж; керновые исследования; Западный нефтегазоносный регион Украины; традиционные и нетрадиционные залежи углеводородов.

L. V. SKAKAL'S'KA, A. V. NAZAREVYCH

Carpathian Branch of the S. Subbotin Institute of Geophysics of the National Academy of Sciences of Ukraine, Ukraine, 79060, Lviv, street Naukova, 3-b; tel./fax +38(032)2648563, e-mail: Skakalska.sbigph@gmail.com, nazarevych-a@cb-igph.lviv.ua

PREDICTING OF OIL-GAS-WATER-SATURATION OF ROCKS OF DIFFERENT LITHOLOGY AND GEODYNAMIC GENESIS IN OPEN-CASTS OF WELLS

Purpose. The aim of the work is developing the methodology of the prediction of oil-gas-water-saturation of rocks in open-casts of wells based on the data of acoustic (seismic) logging (AL, SL) and core research (CR) and its approbation for wells' geological open-casts research of rocks of different lithology and geodynamic genesis.

Methodology. The methodology is based on the theoretical relations between the elastic parameters of rocks, taking into account the influence of operating pressure (depth), porosity, nonlinear elasticity according to the structural and dispersive features of rocks (stratification, microporosity). The empiric dependences between physical and collector properties of rocks with the use of parametric database for rock-collectors of particular territories and geological structures are built. The type of rock pores is predicted by a comparison of the results of speed calculations according to theoretical and empiric dependences with the factual data of AL. In the case of AL (SL) data lack for the investigated wells or separate intervals of their open-casts, a version of the methodology with the establishment and use of correlation relations and gamma logging (GL) data has been developed. The software for the methodology realization is worked out in the Fortran and Excel environment.

Results. The developed methodology has been tested on the well's data of a number of structures of the Western

oil-gas bearing region of Ukraine (Zaluzhans'ka, Lishchyns'ka, Buchachs'ka, Ludyns'ka). For separate wells there were detected not fixed by the previous research thin (from 0,1 m) layers with substantial porosity and filled with gas, water or oil, and also layers with practically zero porosity which can serve as screens. Changes of the elastic (the elastic waves' velocities, the shear modulus, compressibility, the modulus of bulk compression, density, etc.) and collector (porosity) characteristics of the rocks in the open-casts of the investigated wells (clay, marl, siltstone, limestone, sandstone, shale strata) depending on the pressure were studied. On the basis of these data, oil-gas-water-saturation (porosity and the type of the pore filler) of the investigated horizons of the out-casts has been predicted. The differences in elastic and collector characteristics of rocks of different age, type and geodynamic genesis, such as terrigenous-carbonous (Carbonian, Devonian), carbonous (Devonian, Silurian, Cambrian), terrigenous (Devonian, Silurian) were investigated. **Originality.** The novelty of the research consists in methodical approaches with the use of a compressibility parameter of rocks and empirical correlation relations in the theoretical calculations on the basis of the AL or GL data. New are the empiric correlation relations, linking effective pressure, porosity and compressibility for both types of rocks: dry and saturated by liquid for geological open-casts of particular wells, for rocks of different type and geodynamic genesis. Also the new results are thin oil-gas-water-saturated layers and interlayers which are predicted for the first time in the open-casts of a number of wells. By calculations zones of low velocity also are traced. **Practical significance.** The methodology ensures a reliable prediction of the physical characteristics and oil-gas-water-saturation of rocks layers of different thickness (including thin layers – from 0,1–0,2 m) by the data of AL (SL, GL) in wells' open-casts: the porosity coefficient, elastic modules; the type of pore saturation and detecting of nonstructural type traps. The expressions are built for the calculation of coefficients for the corresponding empiric relations which are good for any geological region with available parametric database.

Key words: mathematical prediction; oil-gas-water-saturation of rock; acoustic logging; gamma logging; core research; Western oil-gas bearing region of Ukraine; traditional and unconventional beds of hydrocarbons.

REFERENCES

- Verbickij T. Z., Pochinajko R. S., Starodub Ju. P., Fedorishin O. S. *Matematicheskoe modelirovanie v sejsmo-razvedke* [Mathematical modeling in seismic prospecting]. Kiev, Izd. Naukova dumka [Scientific thought Publ.], 1985, 276 p. (in Russian).
- Verbickij T.Z. *Fizicheskaja priroda nelinejnoj uprugosti geologicheskikh sred s fazovymi mikroneodnorodnostjami i osobennosti rasprostraneniya v nih uprugih voln* [Physical essence of nonlinear elasticity of geological media with phase micro-inhomogeneities and peculiarities of elastic waves propagation in them], *Geofiz. sb. AN USSR* [AS USSR Geophysical collection], Kiev, 1977, issue 75, pp. 16-24 (in Russian).
- Verbyts'kyy T. Z. *Neliniyna pruzhnist' hirs'kykh porid – osnova vyvchennya fizyko-mekhanichnoho stanu zemnoyi kory ta fyuyidonasychnyya plastiv* [Nonlinear elasticity of rocks as the basis for studying of physical and mechanical state of the Earth's crust and the layers fluid saturation]. *Pratsi naukovohto tovarystva im. Shevchenka: Heofizyka: Seysmologichni doslidzhennya* [Proc. of the Shevchenko Scientific Society: Geophysics: Seismological researches]. L'viv, 2002, vol. 8, pp. 99-109 (in Ukrainian).
- Vyzhva S. A., Bezrodna I. M. *Prohnoz produktyvnosti skladno pobudovanykh porid-kolektoriv nafty i hazu za rezul'tatamy inversiyi danykh HDS* [Prognosis of the productivity of complex rock collectors of oil and gas by inversion of the data of the wells geophysical research (WGR)]. *Geodynamics*, 2011, № 2(11), pp. 41–43 (in Ukrainian).
- Vyzhva S. A., Prodayvoda H. T., Bezrodna I. M. *Petrofizychni doslidzhennya yak osnova dlya rozrobky modeli struktury pustotnoho prostoru skladnopobudovanykh karbonatnykh porid-kolektoriv* [Petrophysical studies as the basis for the development of model of structure of hollow space of complex carbonate reservoir rocks]. *Perspektyvy naroshchuvannya ta zberezheniya enerhetychnykh resursiv Ukrayiny. Zb. nauk. Prats'* [Prospects of increasing and preserving the energy resources of Ukraine. Proceedings], Izd. Fakel [Fakel Publ.], Ivano-Frankivs'k, 2006, pp. 110–121 (in Ukrainian).
- Bilets'kyi V. S. *Hirnychyy entsyklopedychnyy slovnyk: u 3 t.* [Mining Encyclopedic Dictionary: in 3 vol.]. Donetsk : Skhidnyy vydavnychyy dim [East Publishing House], 2004, vol. 3, 752 p. (in Ukrainian).
- Zavorot'ko Yu. M. *Fizychni osnovy heofizychnykh metodiv doslidzhennya sverdlodyn.* [Physical bases of geophysical methods for wells investigation], Kyiv, *UkrDHRI* [Ukrainian State Geological Prospecting Institute (UkrSGPI)], 2010. 338 p. (in Ukrainian).
- Zahnitko V., Mykhaylov V. *Heokhimichni osoblyvosti hazovoyi skladovoyi hazonosnykh slantsevykh tovshch Ukrayiny* [Geochemical peculiarities of the gas component of the gas bearing shale strata of Ukraine]. *Visnyk KNU im. T. Shevchenka, Heolohiya* [Bulletin of Taras Shevchenko name Kyiv National University, Geology], 2014, issue. 1, pp. 11–18 (in Ukrainian).
- Itenberg S. S. *Interpretacija rezul'tatov geofizicheskikh issledovanij skvazhin* [Interpretation of the results of the well geophysical research]. Moscow, Izd. Nedra [Interior Publ.], 1987, 375 p. (in Russian).
- Itenberg S. S. *Geofizicheskie issledovanija v skvazhinah* [Geophysical exploration of wells]. Moscow, Izd. Nedra [Interior Publ.], 1982, 351 p. (in Russian).

- Krasnozhon M. D., Ruchko V. O., Ruchko K. O. *Kompleksna interpretatsiya danykh heofizychnykh doslidzhen' sverdlovykh i seysmorozvidky z vykorystannnyam tekhnolohiyi "Heoposhuk"* [Complex interpretation of wells geophysical research and seismic prospecting data by using the "Heoposhuk" technology]. *Zbirnyk naukovykh prats' UkrDHRJ* [Collected articles of UkrSGPI], Kyiv, 2013, No 4, pp. 104–111 (in Ukrainian).
- Krups'kyj Yu. Z. *Heodynamichni umovy formuvannya i naftohazonosnist' Karpat's'koho ta Volyno-Podil's'koho rehioniv Ukrayiny* [Geodynamic conditions of the formation and the oil-and-gas content in the Carpathian and Volyno-Podillya regions of Ukraine]. *Kyiv, Izd. UkrDHRJ* [UkrSGP Publ.], 2001, 144 p. (in Ukrainian).
- Krups'kyj Yu. Z., Kurovets' I. M., Sen'kovskiy Yu. V., Mykhaylov V. A., Chepil' P. M., Dryhant D. M., Shlapins'kyj V. Ye., Koltun Yu. V., Chepil' P. M., Kurovets' S.S., Bodlak V.P. *Netradytsiyni dzhherela vuhlevodniv Ukrayiny: monohrafiya. U 8 kn. Kn. 2. Zakhidnyj naftohazonoosnyj region* [Unconventional sources of hydrocarbons in Ukraine: Monograph. In 8 bk. Bk. 2. Western oil and gas region], Kyiv, Izd. Nika-Tsentr [Nicka Centre Publ.], 2014, 400 p. (in Ukrainian).
- Kurovets' I. M., Dryhant D. M., Chepil' P. M. *Heoloho-petrofizychna kharakterystyka baseynovykh dribnozer-nystykh porid syluru pviddenno-zakhidnoyi okrayiny Skhidno-Yevropeys'koyi platformy* [Geological-petrophysical characteristic of the basin fine-grained Silurian rocks of southwestern margin of the East-European platform], *Zb. nauk. pr. IHN NAN Ukrayiny* [Collected articles of the Institute of Geological Sciences of NAS of Ukraine]. Kyiv, 2010, issue 3, pp. 279–285 (in Ukrainian).
- Kurovets' I. M., Mykhaylov V. A., Zeykan O. Yu., Krups'kyj Yu. Z., Hladun V. V., Chepil' P. M., Hulyi V. M., Kurovets' S. S., Kasyanchuk S. V., Hrytsyk I. I., Naumko I. M. *Netradytsiyni dzhherela vuhlevodniv Ukrayiny: monohrafiya. U 8 kn. Kn. 1. Netradytsiyni dzhherela vuhlevodniv: ohlyad problemy* [Unconventional sources of hydrocarbons in Ukraine: Monograph. In 8 bk. Bk. 1. Unconventional sources of hydrocarbons: the problems review], Kyiv, Izd. Nika-Tsentr [Nicka Centre Publ.], 2014, 208 p. (in Ukrainian).
- Kurovets' I., Sheremeta O., Chepusenko P., Shyra A. *Heoloho-petrofizychni aspekty poshukiv kolektoriv vuhlevodniv u ryfovykh vidkladakh L'viv's'koho paleozoys'koho prohynu* [Geological-petrophysical aspects of hydrocarbon collectors search in the Lviv Paleozoic depression reefs deposits]. *Problemy heolohiyi ta naftohazonosnosti Karpat: Tezy dop. Mizhnar. nauk. konf. do 100-richchya vid dnya narodzhennya chlenakorespondenta URSS M. R. Ladyzhens'koho ta 55-richchya Instytutu heolohiyi i heokhimiyi horyuchykh kopalyn NAN Ukrayiny* [Problems of geology and Carpathian' oil-gas-saturation: Theses of the International scient. conf. dedicated to the 100th anniversary from the birthday of M.R. Ladyzhensky of Corresponding Member of Ukrainian Academy of Sciences and the 55th anniversary of the Institute of Geochemistry of Combustible Minerals of the NAS of Ukraine]. L'viv, 2006, pp. 121–123. (in Ukrainian).
- Leshchuk V. V. *Geoakusticheskoe issledovanie okoloskvazhinnoj sredy* [Geoacoustic investigation of the near-well environment], *Kyiv Naukova Dumka - Kyiv: Naukova Dumka*, 1977. 156 p. (in Ukrainian).
- Kurovets' I., Naumko I., Prytulka H. *Litoloho-petrofizychni i mineralo-flyuyidolohichni vlastyvoli vidkladiv syluru L'viv's'koho paleozoys'koho prohynu* [Lithological-petrophysical and mineral-flyuidological properties of Silurian sediments of the L'viv Paleozoic depression]. *Tezy dop. nauk. konf., prysvyachenoyi 65-richchyu heolohichnoho fakul'tetu L'viv's'koho natsional'noho universytetu imeni Ivana Franka "Stan i perspektyvy suchasnoyi heolohichnoyi osvity ta nauky"* [Theses of the scient. conf., dedicated to the 65th anniversary of the Geology Department of Ivan Franko LNU "State and prospects of modern geological education and science"]. L'viv, October 13–15, 2010, pp. 115–117 (in Ukrainian).
- Metodyka ta aparatura petrofizychnykh doslidzhen'. Petrofizychni doslidzhennya osadovykh porid. Al'manah sovremennoj nauki i obrazovaniya (Publikacija nauchnykh statej)* [Methods and equipment of petrophysical investigations. Petrophysical investigations of sedimentary rocks. Almanac of modern science and education. (Publication of research papers)]. Kyiv, Gramota.net, 2012. Available at: <http://www.gramota.net/>.
- Metodyko-prohramnyy kompleks dlya seysmoakustychnoyi rozvidky slantsevykh haziv na osnovi adekvatnykh modeley strukturnoyi mekhaniky" Zvit pro NDR za proektom № 5726-2 UNTTs* [Methods-software complex for seismoacoustic prospecting of shale gas on the basis of adequate models of structural mechanics: research report on for STCU project № 5726-2] / IAPMM NASU; leader Mykhas'kiv V.V.; executor Skakal's'ka L.V. [et al.]. L'viv, 2014, 121 p. № 0113U000717 (in Ukrainian).
- Mizhnarodna konferentsiya u Varshavi "Shale Gas as a Bridge Energy Carrier from Fossil Fuels to Green Energy"* [The International Conference in Warsaw "Shale Gas as a Bridge Energy Carrier from Fossil Fuels to Green Energy"]. November 14, 2013. Available at: geo.gov.ua ...u...shale-gas-as-a-bridge...carrier...fuels...
- Nazarevych L. Ye. *Seysmichnist' Oles'koyi ploschi: ekolohichni aspekty* [The Oles'ky area seismicity: environmental aspects], *Geodynamics*, 2013, № 2(15), pp. 250–252 (in Ukrainian).
- Noykhaus D. *Perspektyvy netradytsiynoho hazu v Ukrayini ta u sviti* [Prospects of unconventional gas in Ukraine and in the World]. *Tsentr Razumkova: Natsional'na bezpeka i oborona* [Razumkov Centre: National Security and Defence], 2011, No 9, p. 63 (in Ukrainian).
- Omel'chenko V. H., Yankevych Yu. O., Kalyniy T. V. *Perspektyvy naftohazonosnosti syluriys'kykh vidkladiv Volyno-Podil's'koyi naftohazonosnoyi oblasti* [Prospects of oil-and-gas content in Silurian cediments of the Volyno-Podillya oil-and-gas region]. *Ivano-Frankivs'kyi natsional'nyy tekhnichnyy universytet nafty i hazu*

- [Ivano-Frankivs'k National Technical University of Oil and Gas], Ivano-Frankivs'k, 2013, 11 p. (in Ukrainian).
- Prodayvoda H. T., Vyzhva S. A., Bezrodna I. M., Prodayvoda T. H. *Metod vyznachennya fil'tratsiynoyemnisnykh vlastyvostey skladno-pobudovanykh porid-kolektoriv za danymy kompleksnykh heofizychnykh i hidrodynamichnykh metodiv doslidzhennya sverdlodyn* [Method of determining the filtration-capacitive properties of complicatedly built rock-reservoirs by the data of complex geophysical and hydrodynamic methods of well research]. *Materialy Vseukrayins'koyi konferentsiyi „Monitorynh nebezp. heol. prots. ta ekoloh. stanu ser.”* [Proceedings of the All-Ukrainian conference "Monitoring of dangerous geological processes and ecological state of the environment"]. Kyiv, 2006, pp. 55–56 (in Ukrainian).
- Petkevich G. I., Verbickij T. Z. *Issledovanie uprugih svojstv poristykh geologicheskikh sred, sodержashhih zhidkosti* [Investigation of elastic properties of porous geological media containing liquids]. Kyiv, Izd. Naukova Dumka [Scientific thought Publ.], 1965, 76 p. (in Russian).
- Petkevich G. I., Sheremeta O. V., Pritulko G. I. *Metodika petrofizicheskogo izuchenija kollektorov nefiti i gaza v uslovijah, modelirujushhih plastovye* [Methods of the petrophysical study of oil-gas reservoirs in conditions simulating in-situ ones]. Kyiv, Izd. Naukova Dumka [Scientific thought Publ.], 1979, 128 p. (in Russian).
- Petkevich G. I., Verbickij T. Z. *Akusticheskie issledovanija gornykh porod v nefjtjanyh skvazhinah* [Acoustic studies of rocks in oil wells], Kyiv, Izd. Naukova Dumka [Scientific thought Publ.], 1970, 126 p. (in Russian).
- Petrov V.P., Bogatkov O.A., Petrov R.P. *Petrograficheskij slovar'* [Petrographic dictionary]. Moscow, Izd. Nedra [Interior Publ.], 1981, 496 p. (in Russian).
- Skakal's'ka L. V. *Prognozirovanie fizicheskikh i kollektorskih svojstv porod-kollektorov dlja poiska netradicionnogo gaza* [Prediction of physical and reservoir properties of rock-reservoirs for searching of unconventional gas]. *Baku, Nauchnye Trudy* [Baku, Scientific studies], 2014, No 1, pp. 4–10 (in Russian).
- Skakal's'ka L.V. *Prohnozuvannya fizychnykh ta kolektors'kykh vlastyvostey porid-kolektoriv u heolohichnykh strukturakh iz netradytsiynym hazom* [Prediction of physical and reservoir properties of rock-reservoirs in geological structures with unconventional gas], *Geodynamic*, 2013, №. 1(15), pp. 329-331 (in Ukrainian).
- Skakal's'ka L. V. Nazarevych A. V. *Prohnozuvannya flyuyidonasychnennya porid-kolektoriv za danymy hamma-karotazhu* [Prediction of fluid saturation of rock-reservoirs by the gamma-ray log], *Materialy XII Mizhnarodnoyi konferentsiyi «Heoinformatyka: teoretychni ta prykladni aspekty» May 12-15, 2015* [Proceedings of XII International Conference "Geoinformatics: Theoretical and Applied Aspects", May 12–15, 2015], Kyiv, 2015, (CD) (in Ukrainian).
- Skakal's'ka L. V., Nazarevich A. V. *Metodika prognozirovanija petrofizicheskikh harakteristik i vodoneftegazonosnosti razreza (na primere dannyh skvazhiny 3-Buchachskaja, Ukraina)* [Methods of prediction of petrophysical characteristics of oil-gas-water-saturation of well's log (on example of data of the 3-Buchachs'ka well, Ukraine)]. *Ekaterinburg: Mezhotraslevoj institut "Nauka i obrazovanie"* [Yekaterinburg: Interdisciplinary Institute "Science and education"], 2014, No 5, pp. 25–29 (in Russian).
- Skakal's'ka L. V. *Prohnozuvannya fizychnykh ta kolektors'kykh vlastyvostey porid-kolektoriv u heolohichnykh strukturakh iz netradytsiynym hazom* [Prediction of physical and reservoir properties of rock-reservoirs in unconventional gas-bearing geological structures], *Visnyk KNU im. Tarasa Shevchenka. Heolohiya* [Bulletin of Taras Shevchenko KNU. Geology], 2014, No 1(64), pp. 35–40 (in Ukrainian).
- Khekalo P. I. *Prohnozuvannya fizychnykh i kolektors'kykh vlastyvostey hirs'kykh porid za teoretyko-empyrychnymy zalezhnostyamy* [Prediction of physical and reservoir properties of rocks by theoretical and empirical relationships]. Kyiv, *Heofiz. zhurn.* [Geophysics. J.], 2008. – Vol. 30. – No 6, pp. 151–160 (in Ukrainian).
- Keranen K. M., Savage H. M., Abers G. A. and Cochran E. S. Potentially induced earthquakes in Oklahoma, USA: Links between wastewater injection and the 2011 Mw 5.7 earthquake sequence. *Geology*, 2013, Vol. 41, pp. 699-702.
- Kurovets I., Drygant D., Naumko I. Geological and physical-chemical characteristics of lower Paleozoic deposits of Volyno-Podillya, Western Ukraine. *Biuletyn Państwowego Instytutu Geologicznego 449*, 2012, pp. 119–130.
- Poprawa P. Potencjał występowania złóż gazu ziemnego w łupkach dolnego paleozoiku w basenie Bałtyckim i Lubelsko-Podlaskim. *Przegląd Geologiczny*, 2010, Vol. 58, No 3, pp. 226–249 (in Polish).
- Poprawa P. Shale gas hydrocarbon system – North American experience and European potential. *Przegląd Geologiczny*, 2010, Vol. 58, No 3. pp. 216–225.
- Zhen Yu, JingHeA High Resolution Method for Fluid Prediction Based on Geostatistical Inversion Hindawi Publishing Corporation. *International Journal of Geophysics*, vol. 2013, Article ID 845646,. Available at: <http://dx.doi.org/10.1155/2013/845646>, 7 p.

Надійшла 15.04.2015 р.