УДК 553.981/982(477)

**Ігор КУРОВЕЦЬ, Юлія ЛИСАК, Павло ЧЕПУСЕНКО,
Степан МИХАЛЬЧУК, Роман-Данило КУЧЕР**

Інститут геології і геохімії горючих копалин НАН України, Львів,
e-mail: i.kurovets@gmail.com

ГЕОЛОГО-ПЕТРОФІЗИЧНА ХАРАКТЕРИСТИКА ВІДКЛАДІВ СИЛУРУ ВОЛИНО-ПОДІЛЬСЬКОЇ ОКРАЇНИ СХІДНОЄВРОПЕЙСЬКОЇ ПЛАТФОРМИ

Проаналізовано та систематизовано матеріали лабораторних досліджень петрофізичних параметрів порід-колекторів відкладів силуру Волино-Подільської плити з урахуванням даних ГДС.

Проведені дослідження петрофізичних властивостей порід свідчать, що в силурійських відкладах поширені карбонатні колектори зі складною будовою порового простору. Спостерігається помітна зміна ємнісно-фільтраційних параметрів порід силурійських відкладів з глибиною. Пористість порід з глибиною зменшується, а проникність збільшується, що є підтвердженням формування в породах вторинної тріщинно-кавернозної пористості. Збільшення коефіцієнта проникності з глибиною більш характерне для карбонатних порід.

Ключові слова: ємнісно-фільтраційні властивості, літолого-петрофізична характеристика, відклади силуру, Волино-Подільська плита.

Вступ. Ефективність пошуку та розвідки родовищ значною мірою залежить від повноти і всебічного вивчення та узагальнення накопичених геологічних матеріалів. Одним із напрямків удосконалення і підвищення ефективності пошукових робіт є створення ємнісно-фільтраційних моделей розрізів, вивчення типу породи-колектора, визначення петрофізичних властивостей, встановлення структури порового простору та їхніх зв'язків із даними геофізичних досліджень.

Фактичний геологічний матеріал із силурійських відкладів досліджувався багатьма фахівцями, однак питанням поширення колекторів, ємнісно-фільтраційних властивостей, літолого-петрофізичних особливостей приділялося значно менше уваги, і є потреба їхнього детального вивчення. Аналіз основних критеріїв для оцінки нафтогазоносності, зокрема таких, як наявність колекторів і покришок, різного типу пасток, розривних порушень, а також численні газопрояви, відповідна аналогія в геологічній будові та умовах нафтогазоносності з іншими давніми платформами вказують на високу перспективність силурійського комплексу, пов'язану як з традиційними, так і нетрадиційними покладами вуглеводнів (Доленко и др., 1980; Чиж и др., 1985; Крупський, 2001; Крупський та ін., 2014). Із силурійськими утвореннями пов'язана велика кількість нафтогазопроявів різного характеру. Найістотніші

© Ігор Куровець, Юлія Лисак, Павло Чепусенко,
Степан Михальчук, Роман-Данило Кучер, 2019
ISSN 0869-0774. Геологія і геохімія горючих копалин. 2019. № 4 (181)

прояви зафіксовані на Локачинській площі. Так, при випробуванні відкладів скальського горизонту у св. Локачі-12 отримано невеликий приплив нафти. За даними хімічного аналізу в лабораторії УкрДГРІ, нафта слабкосмолиста, з високим вмістом парафіну. Невеликий приплив нафти з горючим газом отримано у св. Локачі-10 з інтервалу 1383–1434 м. При випробовуванні маловецького горизонту у св. Локачі-9 отримано води з плівкою нафти і виділенням газу на гирлі свердловини. У св. Локачі-15 із баговецького і малиновецького горизонтів отримано воду з розчиненим газом, який горів на гирлі свердловини. Нафта, у вигляді примазок і включень, спостерігалася в буровому розчині при проходці бурінням скальського горизонту у свердловинах Локачі-5 (інт. 1320–1324 м), Локачі-6 (інт. 1676–1708 м) та Локачі-10 (інт. 1289–1310 м). Зразки керна кавернозних доломітів скальського і малиновецького горизонтів у низці свердловин просочені нафтою. Породи баговецького горизонту в більшості свердловин на пл. Локачі та у свердловинах, пробурених в районах Коронець–Тишковці, Бучач, мають різкий бітумінозний запах. Із того самого горизонту у св. Володимирівська-1 (інт. 1808–1862 м) отримано приплив газу дебітом 130 м^3/год з пластовою водою. У св. Бучач-1 під час розкриття скальського горизонту (інтервал 950–990 м) спостерігалося розгазування бурового розчину. У свердловинах Великі Мости, Литовеж-1, Балучин-1 по всьому розрізу силурійських відкладів, за даними газового каротажу, виявлений підвищений вміст газу 0,7–7 % за фонових значень 0,1–0,3 %. Найвищий вміст газу в буровому розчині (до 10 %) зафіксований при бурінні силурійських відкладів у св. Лудин-1 (інтервал 2290–2360 м). Наявність легких вуглеводнів встановлено, за даними мінерало-флюїдологічних досліджень, у мінералах і закритих порах вапняків силуру на Бучицькій площі (Куровець, Наумко, 2009; Наумко та ін., 2009; Naumko et al., 2017). Ці вуглеводні у вапняках в розрізі св. Бучач-3 складені за об'ємом 98,8–99,9 % метаном і 0,1–1,2 % діоксидом вуглецю. У включеннях у кальциті з виділень у вапняку метан становить 100 % за об'ємом. У Литві в силурійському рифовому комплексі Балтійської синеклізи, який за геологічною будовою подібний до Волино-Подільського, відкрито Кударське, Кибартайське, Липгиряйське і Шаукенське нафтові родовища (Крупський, 2001). Відсутність у силурійських відкладах Волино-Поділля виявлених промислових скупчень вуглеводнів, на думку дослідників, зумовлена багатьма причинами, зокрема мінливістю порід-колекторів за площею і розрізом та їхньою поліфаціальністю, недостатньою геолого-геофізичною вивченістю, неефективною технологією розкриття свердловинами низькопористих порід-колекторів, у яких формуються глибокі зони кальматації, недостатні депресії та неефективні технології при випробуванні перспективних горизонтів із пластовими тисками, меншими від гідростатичних (Доленко и др., 1980; Чиж и др., 1985; Крупський, 2001; Крупський та ін., 2014).

Метою роботи було вивчення колекторських властивостей порід, аналіз та систематизація матеріалів лабораторних досліджень петрофізичних параметрів порід-колекторів відкладів силуру Волино-Подільської плити з урахуванням даних ГДС.

Об'єктом досліджень були силурійські відклади, поширені на всій території Волино-Поділля і представлені нижнім та верхнім відділами. Нижній

відділ складений китайгородським і баговицьким горизонтами венлоцького ярусу, а верхній – малиновецьким горизонтом лудловського ярусу та скальським горизонтом пржидольського ярусу. Силурійські відклади утворювалися в умовах морського басейну з нормальною солоністю, вони сформовані поліфаціальною карбонатною формацією, яка складається з прибережно-морської лагунної і морської шельфової літофацій та рифової літофації, розвинутої в зоні переходу шельфу до відкритого басейну (Крупський, 2001; Kurovets et al., 2012a, 2012b; Крупський та ін., 2014).

Прибережно-морська зарифова літофація простягається на схід від зони Радехівського, Збаразького та Теребовлянського розломів і представлена чергуванням різнозернистих органогенно-уламкових детритових вапняків сульфатизованих доломітів, мергелів та аргілітів з прошарками ангідритів. Аргіліти переважають у верхній частині розрізу. У малиновецькому горизонті трапляються прошарки туфів завтовшки до 6 м. Доломіти й ангідрити розвинуті переважно в східній частині, а в напрямку відкритого моря в розрізі поступово починають домінувати різноманітні органогенні вапняки.

Передрифові фації відкритого морського басейну поширені в західній частині Волино-Поділля і складені чергуванням зернистих детритових, шламово-детритових вапняків, різною мірою вапнистих аргілітів та алевролітів при істотному переважанні теригенних порід. Кількість карбонатних прошарків поступово зменшується в напрямку Передкарпатського прогину.

Рифові утворення присутні в баговицькому, малиновецькому та скальському горизонтах і простягаються вузькою смугою (10–40 км) у субмеридіональному напрямку від Володимир-Волинського розлому до м. Чернівці. У межах цих утворень виокремлюються морфоструктури − біогерми, які можуть бути пастками для нафти і газу. За даними буріння, органогенні споруди утворені різноманітними карбонатними породами з незначною домішкою глинистого матеріалу. Карбонатні породи складені в основному органогенними, органогенно-уламковими вапняками та органогенними доломітами. Вапняки містять переважно залишки коралів, строматопорів, криноїдів, остракодів, брахіопод і водоростей. Потужність силурійських відкладів поступово збільшується в західному та південно-західному напрямках і у Львівському прогині досягає 1000 м і більше.

Методика досліджень включала комплексне вивчення ємнісно-фільтраційних властивостей порід-колекторів, їхніх літолого-петрографічних і структурно-текстурних особливостей. Проаналізовано розподіл петрофізичних параметрів силурійських відкладів Волино-Подільської плити. Крім того, були використані та систематизовані результати лабораторних досліджень, виконаних раніше (Лисак, 2012; Куровець, Лисак, Чепусенко, 2017; Куровець, Приходько та ін., 2017; Kurovets et al., 2018; Artym et al., 2019).

Літолого-петрографічні особливості і петрофізичні властивості силурських відкладів ми вивчали у св. Бучач-3, Лудин-15, Ліщинська-1.

Результати досліджень. У св. Бучач-3 силурійські відклади розкриті в інтервалі глибин 925−1380 м. Детальна геофізична і петрофізична характеристика відкладів силуру наведена на рис. 1. За даними літолого-петрографічного вивчення, зразки порід з інтервалу глибин 900–957 м представлені аргілітами вмісних порід, вапнистими вуглефікованими, з поодинокими уламками

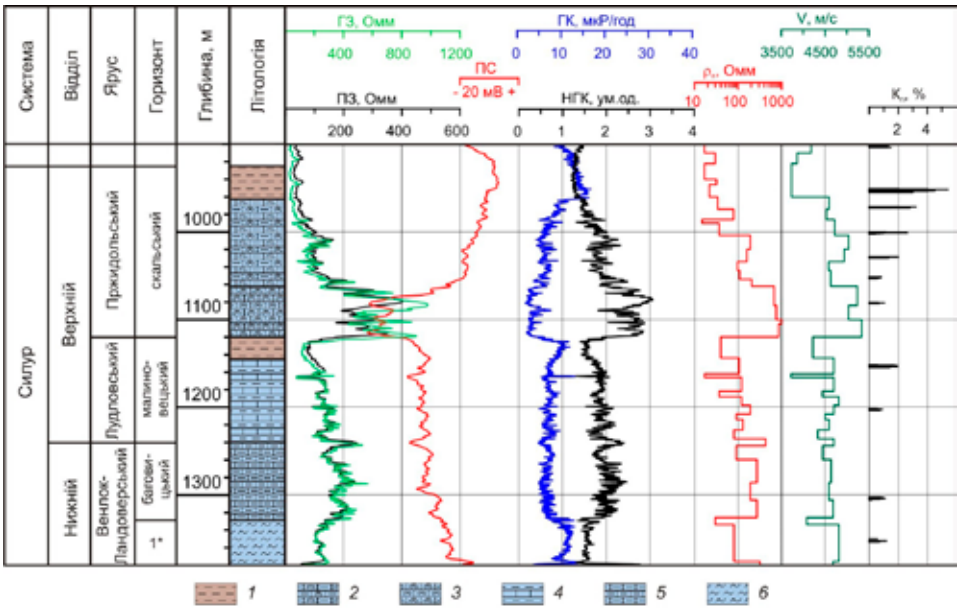


Рис. 1. Геофізична та петрофізична характеристика відкладів силуру св. Бучач-3:
1 – ангідрит; *2* – вапняк біоморфний глинистий; *3* – вапняк рифовий; *4* – перешарування вапняку з ангідритом; *5* – вапняк глинистий; *6* – мергель; 1* – китайгородський горизонт

органічних решток (рис. 2, *а*, *б*). В інтервалі 970–1084 м розвинуті біогермні уламкові конгломератоподібні вапняки, які містять колонії моховаток, коралів, скелетні рештки трилобітів (рис. 2, *в–ж*). В інтервалі глибин 1151–1157 м присутні вапняки з рештками криноїдей, а в інтервалі глибин 1302–1306 м наявні вапняки детритові, глинисті, неясношаруваті, тріщини яких виповнені бітумною речовиною бурого кольору.

У підошві силурійських відкладів (1350–1354 м) залягають мергелі, які догори за розрізом переходять у глинисті вапняки. Мергелі щільні, глинисті, вапнисті, сіро-зеленуватого відтінку. Вапняки темно-сірі, щільні, з різним ступенем глинистості. Присутність глинистого матеріалу підтверджується підвищеною радіоактивністю на діаграмі ГК, пониженими значеннями НГК та електричного опору.

В окремих зразках біоморфних, конгломератоподібних вапняків розвинуті субвертикальні макротріщини, виповнені кальцитом, а також мікротріщини у вапнистих аргілітах й органогенно-детритових вапняках та тріщини і мікрокаверни в органогенно-детритовому вапняку. Мікротріщини та каверни виповнені бітумами, в окремих випадках – кальцитом (див. рис. 2, *д*, *е*) і поліморфною полімінеральною речовиною. Спостерігаються кулісоподібні субвертикальні тріщини, виповнені кальцитом.

За результатами аналізу літолого-петрографічних і палеонтологічних особливостей рифових відкладів з використанням даних ГДС, розріз силуру, розкритий св. Бучач-3, можна розчленувати на окремі частини, згідно з ідеалізованою схемою (див. рис. 1):

• 1330–1380 м – глинисті вапняки і вапнисті мергелі припідошвової частини рифового тіла;

• 1200–1330 м – базальні біокластичні накопичення початкової стадії акумуляції;

• 1120–1200 м – споруда із мікритового бафлстоуна нижче базису дії хвиль;

• 965–1120 м – баундстоун і фреймстоун каркасного рифу з боку відкритого морського басейну;

• 865–965 м – вмісні шари глинистих та органогенно-детритових порід без уламків каркасотвірних організмів (мадстоун і вакстоун).

Силурійські відклади інтенсивно ущільнені під впливом регіонального прогресивного стадійного катагенезу. Ознак міжстадійних (локальних) вторинних змін (перекристалізації, доломітизації, гіпогенного алогенезу, дилатансійних і геосолітонних процесів тощо) у досліджуваному розрізі, за винятком субвертикальної залікованої кальцитом тріщинуватості для окремих зразків з інтервалу глибин 1302–1306 м, не встановлено.

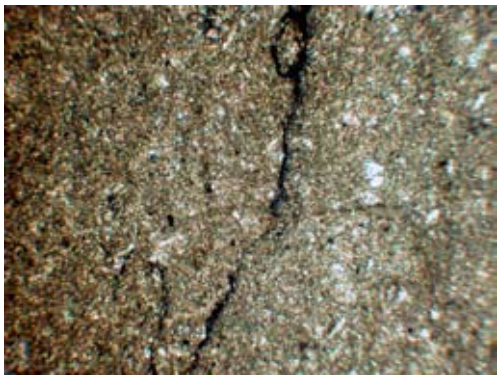
За результатами петрофізичного лабораторного вивчення, досліджувані зразки силурійських рифових відкладів належать до порід з низькими колекторськими властивостями. Так, для вапняків величина відкритої пористості змінюється в межах від 0,37 до 3,02 % при зміні об'ємної ваги від 2,65 до 2,74 г/см^3. Вони є практично непроникними породами, тільки для окремих зразків коефіцієнт проникності досягає максимальної величини $0{,}0032 \cdot 10^{-15}$ м^2. Мергелі та глинисті вапняки з підошвової частини розрізу силуру (1302–1354 м) сильно ущільнені. Коефіцієнт відкритої пористості для них змінюється в межах від 0,18 до 1,19 % при зміні об'ємної ваги від 2,69 до 2,74 г/см^3.

За даними ГДС, розріз силурійських відкладів досить диференційований. Електричний опір порід змінюється від 17 Омм в аргілітах до 1000 Омм у рифових вапняках. Пластова швидкість акустичних хвиль змінюється відповідно від 3730 до 5338 м/с. Найбільшими значеннями електричного опору і швидкості характеризуються вапняки рифогенної фації. Вапняки рифу чітко вирізняються в розрізі і за діаграмами ПС, ГК та НГК. Від'ємна аномалія на кривій ПС вказує на практичну проникність рифових відкладів. Електричний опір глинистих вапняків становить переважно 100–270 Омм, а пластова швидкість – 4400–4700 м/с. Мергелі вирізняються дещо пониженим електричним опором (80–90 Омм) і підвищеною природною радіоактивністю.

За результатами статистичного аналізу даних петрофізичних досліджень, коефіцієнт пористості карбонатних порід силуру тісно корелюється з питомою вагою. Коефіцієнт кореляції між величинами $К_п$ і δ становить –0,74. Спостерігається помітний зв'язок між пористістю та карбонатністю порід: чим вища карбонатність, тим менша пористість. Коефіцієнт кореляції між $К_п$ та *С* рівний –0,47. Зв'язок між проникністю і пористістю майже відсутній. Коефіцієнт кореляції між величинами Lg $К_{пр}$ та $К_п$ становить –0,18. З огляду на це можна припустити, що проникність карбонатних порід спричинена мікротріщинуватістю.

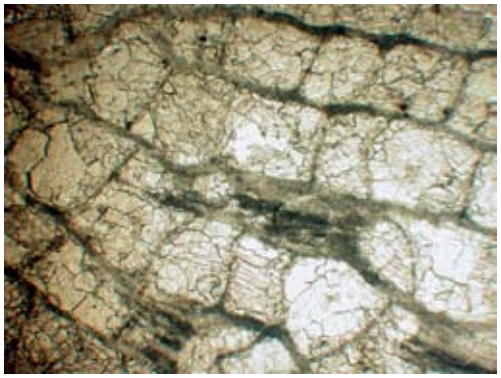
Свердловина Лудин-15 пробурена в північно-західній частині Львівського палеозойського прогину, де силурійські відклади розкриті в інтервалі глибин 2203–2613 м. Літолого-петрографічні та петрофізичні дослідження силурійських порід проведено на дванадцяти зразках із трьох інтервалів відбору керна (2196–2202, 2560–2568 та 2610–2617 м). Породи характеризуються

а



б

в

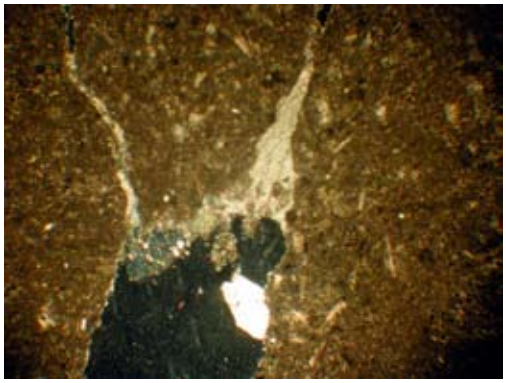


г

Рис. 2. Породи силурійського віку св. Бучач-3.
Аргіліт вапнистий, шаруватий, із вмісних відкладів, інтервал глибин 950–958 м: *а* – вертикальний зріз керна в натуральну величину; *б* – зображення шліфа з вертикальною тріщиною, виповненою пелітоморфною полімінеральною речовиною, зб. 4.7 х 10, нік. ||.
Вапняк біоморфний, уламковий, інтервал глибин 1028–1034 м: *в* – вертикальний зріз керна в натуральну величину; *г* – зображення шліфа з колонією коралів, зб. 4.7 х 10, нік. ||

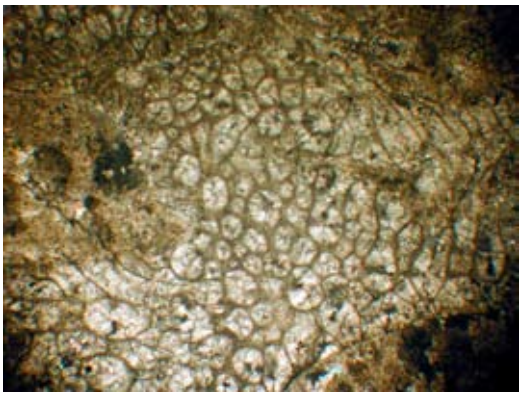
значною мінливістю мінералого-петрографічного складу. За даними макро- і мікроскопічних досліджень, діагностовані такі літологічні типи порід: аргіліт алевритовий з пелітошаруватою текстурою і видовженими виділеннями піриту, органогенно-детритовий перекристалізований та ангідритизований вапняк, вапняк біогермний перекристалізований, вапняк біогермний дрібнокристалічний ангідритизований. Міжформенна маса в органогенно-уламкових вапняках часто пігментована світло-бурими бітумами. В окремих випадках спостерігається тонка шаруватість аргіліту алевритового з вапняком органогенно-уламковим. Вапняки трапляються переважно у вигляді прошарків, окремих конгломератоподібних уламків та окремих включень в алевролітах або аргілі-

д



е

є



ж

Вапняк біоморфний, конгломератоподібний, інтервал глибин 1051–1055 м: *д* – вертикальний зріз керна в натуральну величину; *е* – зображення шліфа з каверною та тріщиною, виповненими кальцитом, зб. 4.7 х 10, нік. +.
Вапняк органогенно-уламковий, конгломератоподібний, інтервал глибин 1080–1084 м: *є* – вертикальний зріз керна в натуральну величину; *ж* – зображення шліфа з колонією моховаток, зб. 4.7 х 10, нік. ||

тах. Вапняки містять велику кількість органогенних решток, представлених фрагментами водоростей, моховаток, дрібних черепашок остракод, члеників криноїдей та уламків двостулкових молюсків. Найбільш імовірно, що досліджувані породи належать передрифовим відкритошельфовим літофаціям.

За результатами проведених лабораторних досліджень, відібрані зразки порід ущільнені і міцнозцементовані. Об'ємна вага карбонатних порід становить 2,70–2,72 г/см^3, а аргілітів та алевролітів – 2,66–2,70 г/см^3. Відкрита пористість вапняків змінюється в діапазоні 1,3–4,3 %, а проникність – (0,006–0,073)$\cdot 10^{-15}$ м^2. Відкрита пористість аргілітів становить 0,6–2,4 %, і вони практично непроникні. Вміст карбонатного матеріалу в більшості алевролітів

та аргілітів 9–20 %. Вапняки переважно глинисті і містять 33–56 % теригенних домішок. Отримані результати лабораторних досліджень колекторських і петрофізичних властивостей зразків керна характеризують частину розрізу, складену виключно породами-неколекторами. На це вказує також низький винос керна (25 %), представленого тільки ущільненими літологічними різновидами порід.

За даними ГДС, геологічний розріз св. Лудин-15 складений вапняками різного ступеня глинистості, мергелями і перешаруванням аргілітів, алевролітів, вапняків та мергелів. Карбонатні породи вирізняються підвищеним електричним опором (78–190 Омм), пониженими значеннями гамма-випромінювання (4–5 мкР/год) і від'ємними аномаліями ПС. Глинисті пачки порід характеризуються дещо нижчим електричним опором (49–81 Омм) і більш високою радіоактивністю (8–11 мкР/год). Для мергелів на діаграмах каротажу, на відміну від вапняків та аргілітів, характерні проміжні значення фізичних параметрів. Їхній електричний опір змінюється залежно від ступеня карбонатизації. Коефіцієнт пористості карбонатних порід за даними акустичного каротажу – 5–7 %. За промислово-геофізичною характеристикою вони належать до низькопористих складнопобудованих колекторів.

Параметрична свердловина Ліщинська-1 пробурена в склепінні Ліщинської структури.

Силурійські відклади залягають на глибині 2278–3537 м. Літологічний склад порід одноманітний. За наявними геолого-геофізичними даними, формування силурійських відкладів відбулося в умовах нормально солоного морського басейну. За даними каротажу, у розрізі виокремлюється низка трансгресивно-регресивних циклів, найбільшими з яких є венлоцько-ранньолудловський, середньо-пізньолудловський і пізньолудловсько-пржидольський, які раніше виділив Є. І. Чиж (Чиж и др., 1985). При цьому переважає трансгресивний режим, що сприяв нагромадженню глинисто-алевритових відкладів. Геологічний розріз складений аргілітами, глинистими мергелями з прошарками вапняків та алевролітів.

Для лабораторних петрофізичних досліджень відібрано 54 зразки керна в інтервалі 2501–3504 м. Вони представлені переважно аргілітами, а також алевролітами, мергелями і вапняками. Аргіліти тонкошаруваті, гідрослюдисті, алевритисті, з прошарками алевролітів, поодинокими прошарками кальциту та вкрапленнями піриту, збагачені вуглефікованою органікою. Алевритисті аргіліти переважають у нижніх частинах китайгородської і скальської світ. Вапняки органогенно-детритові, перекристалізовані, глинисті, із прошарками аргіліту та оксидами заліза. З органічних залишків містяться граптоліти. Трапляються спікули губок, рештки раковин брахіопод та остракод.

Унаслідок тривалої дії катагенетичних процесів силурійські відклади інтенсивно ущільнювалися, набуваючи відносно великої об'ємної ваги і низьких ємнісно-фільтраційних властивостей. Об'ємна вага зразків порід становить 2,7–2,79 г/см^3 при зміні відкритої пористості від 0,21 до 4,15 %. Найменша об'ємна вага (2,7–2,74 г/см^3) характерна для аргілітів із вмістом вуглефікованої речовини, а найбільша – для вапняків та аргілітів з прошарками кальциту і включеннями піриту. Більшість зразків має пористість меншу, ніж 2 %. Наявні зразки порід майже непроникні. Відомо, що під час відбору керна

на поверхню виносяться ущільнені зразки порід, колекторські і петрофізичні властивості яких характеризують породи-неколектори. За даними ГДС, пористість карбонатних порід та мергелів становить 3–8 %, а поодиноких пластів сягає 10 %. Пористість глинистих вапняків і мергелів не перевищує 3–5 %. Електричний опір пластів змінюється від 20 до 224 Омм. Низьким опором характеризуються глинисті різновиди карбонатних порід. Виокремлені за даними ГДС пласти водонасичені, ущільнені і належать до низькопористих колекторів.

Передрифовий депресійний тип силурійського розрізу розкритий свердловинами Перемишляни-1, Підгайці-2, Новий Витків-2, -3, Великі Мости-150, Балучин-15, Загорівська-1 та ін. (Доленко и др., 1980; Дригант, 2000). Відкрита пористість карбонатних порід у межах цієї зони переважно не перевищує 3–4 % і тільки поодиноких зразків на площі Новий Витків та у св. Загорівська-1 сягає 6,0–6,6 %. Проникність зразків менша, ніж $0{,}1 \cdot 10^{-15}$ м^2. Низькі колекторські властивості порід зумовлені як первинними седиментаційними факторами, зокрема підвищеним вмістом глинистого матеріалу, так і інтенсивним розвитком епігенетичних процесів – кальцитизацією, скременінням тощо.

Лагунно-шельфові відклади розкриті св. Володимир-Волинська-1, -2, Луцьк-1, Горохів-1, Берестечко-1, низкою свердловин на площі Локачі та ін. Колекторські властивості силурійських порід у межах цієї зони загалом низькі. Значення відкритої пористості більшості зразків керна не перевищують 4–5 %, а проникність – $0{,}1 \cdot 10^{-15}$ м^2. Більш пористі породи трапляються в західній частині зони, де вони занурені на невелику глибину. Так, поодинокі зразки пісковиків у св. Луцьк-1 мають пористість 7,8–11,1 %, а у свердловині Володимир-Волинська-2 значення пористості порід досягає 20 %, а проникності – $90{,}3 \cdot 10^{-15}$ м^2.

Органогенні споруди силуру розкриті на Оглядівській, Мінковицькій, Локачинській, Горохівській, Коропець-Пишківецькій, Підгайцівській і Бучацькій площах. За наявними геолого-геофізичними даними, силурійські споруди складені різноманітними породами з невеликими домішками глинистого матеріалу. Карбонатні породи представлені, в основному, органогенними, органогенно-уламковими, уламковими вапняками та органогенними доломітами.

Відкрита пористість силурійських карбонатних порід у межах розвитку органогенних споруд, за даними лабораторних досліджень керна, змінюється від 0,7 до 16,2 %, а проникність – від майже непроникних до $2 \cdot 10^{-15}$ м^2 (Лисак, 2012). Максимальні значення проникності $46{,}9 \cdot 10^{-15}$ м^2 зафіксовані в зразках доломіту у св. 5-Локачі. Переважно проникність зразків порід менша, ніж $0{,}01 \cdot 10^{-15}$ м^2. Однак потрібно враховувати, що при лабораторних дослідженнях керна отримуємо занижені значення пористості і проникності, оскільки в невеликих об'ємах зразків відсутні каверни значного діаметра (2–3 см) та тріщини, які утворюються при вторинних процесах. Для органогенних, органогенно-уламкових вапняків і вторинних доломітів, біогермів характерні порові, кавернозні, тріщинно-порові та тріщинно-кавернозні колектори. Первинна пористість цих порід низька, не перевищує 3–4 % і зумовлена пустотами як усередині організмів, так і між ними. Серед вторинних пустот спостерігаються пори перекристалізації, доломітизації, каверни

і тріщини. Утворення вторинної пористості в силурійських біогермних породах пов'язане з процесами перекристалізації, доломітизації, вилуговування та тектонічного розущільнення порід (Крупський та ін., 2014).

Із допомогою методів математичної статистики проаналізовано розподіл петрофізичних параметрів силурійських відкладів Волино-Подільської плити (Лисак та ін., 2016). Обчислені головні статистики, коефіцієнти кореляції між окремими параметрами, побудовані гістограми розподілу коефіцієнтів пористості $К_п$ та проникності $К_{пр}$, об'ємної ваги δ і карбонатності *C* у породах, складені рівняння регресій між параметрами та їхні зміни з глибиною. Проаналізовано петрофізичні параметри наявних зразків окремо для карбонатних і теригенних порід силуру.

Головні статистики і кореляційні матриці для теригенних та карбонатних порід силуру наведені в табл. 1 і 2. Коефіцієнт пористості теригенних порід помітно зменшується зі збільшенням глибини залягання. Коефіцієнт кореляції між параметрами $К_п$ і *H* рівний –0,53. Величини пористості порід найтісніше корелюються з об'ємною вагою (δ). Коефіцієнт кореляції між параметрами $К_п$ і δ для теригенних порід становить –0,73. Зв'язок між величинами пористості і відносного опору слабкий (r = –0,35). Проникність порід силурійських відкладів дещо зростає з глибиною їхнього залягання, що вказує на формування в них тріщинної пористості. Проникність теригенних порід найтісніше корелюється з відносним опором. Коефіцієнт кореляції між величинами Lg $К_{пр}$ і Lg $P_п$ рівний –0,79. На відносний опір значною мірою впливає вміст карбонатного матеріалу. Збільшення карбонатності порід спричинює підвищення їхнього електричного опору. Коефіцієнт кореляції між параметрами Lg $P_п$ і *C* рівний 0,59. Зв'язок між коефіцієнтами проникності і пористості менш помітний (0,19 – для теригенних порід і 0,29 – для карбонатних). Кореляційні зв'язки між петрофізичними параметрами для карбонатних порід порівняно з теригенними виражені слабше. Зв'язок коефіцієнта пористості з глибиною і відносним опором незначний: коефіцієнти кореляції становлять відповідно –0,16 і –0,13. При цьому в карбонатних породах більш помітно зменшується з глибиною вміст карбонатного матеріалу.

Коефіцієнт кореляції між параметрами *C* і *H* рівний –0,45. Збільшення вмісту карбонатного матеріалу в карбонатних породах, на відміну від теригенних, призводить до зменшення електричного опору і зростання проникності. Коефіцієнти кореляції параметра *C* з Lg $P_п$ та Lg $К_{пр}$ становлять відповідно –0,55 і 0,15. Це вказує на те, що в карбонатних породах відбуваються інтенсивніше вторинні процеси – доломітизація, перекристалізація, вилуговування, унаслідок яких утворюються вторинні пори та мікротріщини. Наявність вторинних пор і мікротріщин зумовлює збільшення проникності та зниження електричного опору порід. Гістограми розподілу параметрів $К_п$, Lg $К_{пр}$, δ і *C* та графік змін їхніх значень з глибиною для теригенних і карбонатних порід зображені на рис. 3, 4. Гістограми всіх наведених параметрів неоднорідні та асиметричні, характеризуються, зазвичай, двовершинними кривими розподілу, одна з яких відображає породи-колектори, а інша – породи-неколектори.

Основні двомірні петрофізичні моделі силурійських відкладів наведено в табл. 3. Ці моделі порід малоінформативні через значну неоднорідність їхнього мінерального складу і різноманітну будову пустотного простору. Лише

Т а б л и ц я 1. **Головні статистики петрофізичних параметрів теригенних та карбонатних порід силуру**

	Кількість	Середнє	Мінімум	Максимум	Статистичне відхилення	Асиметрія	Ексцес
для теригенних порід							
H, км	99	2,285	0,354	3,502	0,893	–0,615	–0,797
$К_п$	99	0,023	0,002	0,111	0,019	2,016	5,440
Lg $К_{пр}$	32	–2,400	–6,00	0,727	2,176	–0,735	–0,790
C	99	0,107	0,00	0,491	0,121	1,732	2,517
δ, г/см^3	90	2,693	2,300	2,800	0,077	–2,379	7,935
Lg $P_п$	15	3,740	2,435	5,016	1,162	–0,142	–2,254
для карбонатних порід							
H, км	133	1,620	0,402	3,001	0,638	0,962	–0,204
$К_п$	133	0,019	0,002	0,162	0,019	4,139	25,443
Lg $К_{пр}$	109	–2,949	–6,000	0,978	2,155	–0,506	–1,349
C	133	0,544	0,00	0,972	0,285	–0,485	–0,742
δ, г/см^3	122	2,713	2,440	2,850	0,045	–1,265	12,136
Lg $P_п$	36	3,146	2,347	5,099	0,695	2,089	3,584

Т а б л и ц я 2. **Кореляційна матриця петрофізичних параметрів теригенних та карбонатних порід силуру**

	H, км	$К_п$	Lg $К_{пр}$	*C*	δ, г/см^3	Lg $P_п$
для теригенних порід						
H, км	1,00	–0,50	0,25	–0,29	0,32	–0,33
$К_п$		1,00	0,19	0,07	–0,73	–0,35
Lg $К_{пр}$			1,0	–0,08	–0,09	–0,79
C				1,00	–0,03	0,59
δ, г/см^3					1,00	0,52
Lg $P_п$						1,00
для карбонатних порід						
H, км	1,00	–0,16	0,30	–0,45	0,12	0,43
$К_п$		1,00	0,29	0,17	–0,19	–0,13
Lg $К_{пр}$			1,00	0,15	0,11	–0,30
C				1,00	–0,02	–0,55
δ, г/см^3					1,00	0,00
Lg $P_п$						1,00

залежності між параметрами пористості, проникності та об'ємної ваги для теригенних порід є значимими.

Таким чином, палеогеографічні умови утворення і наступних постседиментаційних перетворень зумовили петрофізичні властивості порід силурійського віку. Утворення силурійських відкладів у східній частині палеозойського прогину відбувалося в лагунно-шельфових умовах, а в західній частині – в умовах відкритого моря. Зміна палеогеографічних умов зумовила

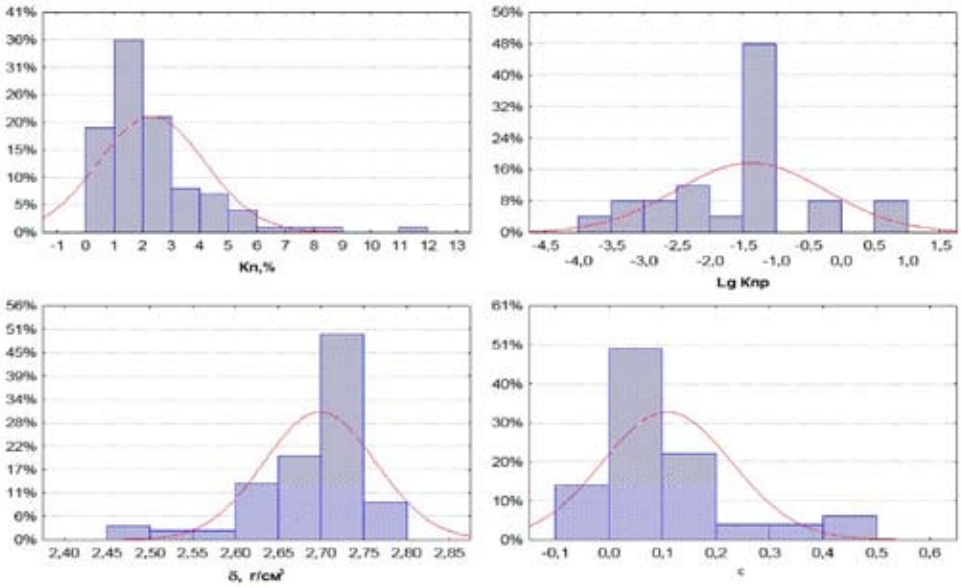


Рис. 3. Гістограми петрофізичних параметрів ($К_п$, Lg $К_{пр}$, δ, *C*) теригенних порід силурійських відкладів Волино-Подільської плити

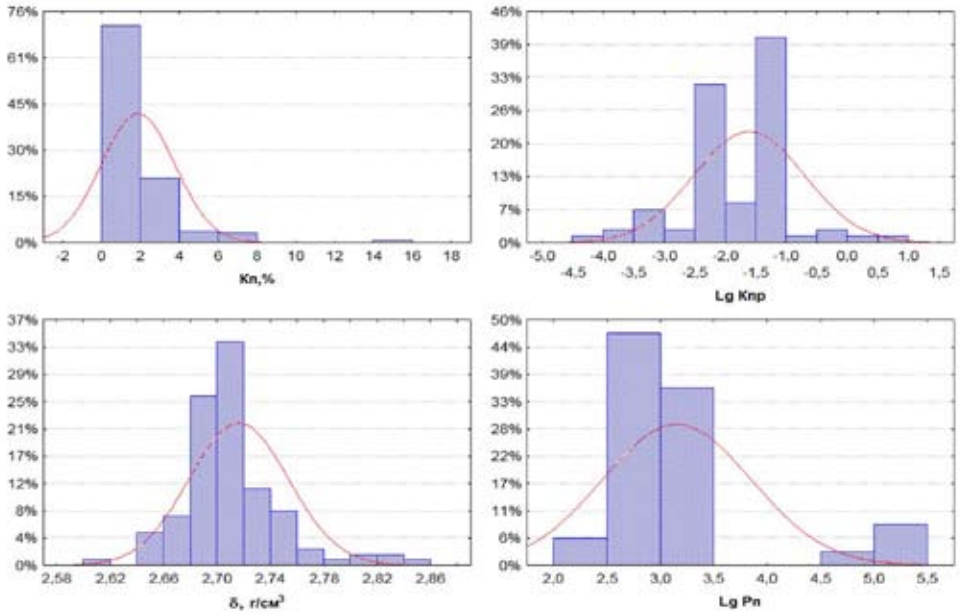


Рис. 4. Гістограми петрофізичних параметрів ($К_п$, Lg $К_{пр}$, δ, Lg $P_п$) карбонатних порід силурійських відкладів Волино-Подільської плити

зміну літологічного складу відкладів у тому самому напрямку: із суто карбонатного – на глинисто-карбонатний і карбонатно-глинистий. У зоні переходу шельфу до відкритого басейну формувалися різні за морфогенетичними особливостями органогенні споруди.

Т а б л и ц я 3. **Петрофізичні моделі порід відкладів силуру**

Кількість точок, *n*	Рівняння регресії	Коефіцієнт кореляції, *r*
Теригенні породи		
98	$К_п = 5{,}94 \cdot e^{-0{,}4534 \cdot H}$	0,53
25	$Lg\ К_{пр} = -1{,}94 \cdot e^{-0{,}2384 \cdot H}$	0,24
99	$C = 0{,}21 \cdot e^{-0{,}3288 \cdot H}$	0,29
89	$\delta = 2{,}63 \cdot e^{-0{,}0092 \cdot H}$	0,32
19	$Lg\ К_{пр} = -0{,}416255 \cdot e^{0{,}495278 \cdot \delta}$	0,7
89	$К_п = -23{,}6 \cdot \delta + 65{,}7785$	0,73
Карбонатні породи		
132	$К_п = 3{,}15 \cdot e^{-0{,}3411 \cdot H}$	0,17
76	$Lg\ К_{пр} = -2{,}88 \cdot e^{-0{,}3659 \cdot H}$	0,33
133	$C = 0{,}91 \cdot e^{-0{,}3282 \cdot H}$	0,41
121	$\delta = 2{,}7 \cdot e^{0{,}0026 \cdot H}$	0,12
76	$Lg\ P_п = 4{,}4064 - 1{,}71 \cdot C$	0,55

Висновки. Проведені дослідження петрофізичних властивостей порід свідчать, що в силурійських відкладах поширені карбонатні колектори зі складною будовою порового простору. Породи-колектори із задовільними колекторськими властивостями, як правило, локалізуються в біогермних спорудах. За межами органогенних побудов ємнісно-фільтраційні властивості силурійських порід переважно низькі, зі середньою пористістю 3–5 % і проникністю меншою, ніж $0{,}01 \cdot 10^{-15}$ м^2. Спостерігається помітна зміна ємнісно-фільтраційних параметрів порід силурійських відкладів з глибиною. Пористість порід з глибиною зменшується, а проникність збільшується, що є підтвердженням формування в породах вторинної тріщинно-кавернозної пористості. Збільшення коефіцієнта проникності з глибиною більш характерне для карбонатних порід.

За наявними геолого-геофізичними даними, породи-колектори з кращими ємнісно-фільтраційними властивостями поширені в смузі бар'єрного рифу. Найкращі колекторські параметри властиві кавернозним доломітам і вапнякам на площі Локачі та в районі Луцька. На глибинах понад 2500 м колектори пористого типу майже відсутні. Тут значна роль у покращенні колекторських властивостей порід належить їхній тріщинуватості. Мікротріщини спостерігаються в глинистих вапняках, мергелях і глинистих породах. За сприятливих геодинамічних умов утворюються субвертикальні зони розущільнення, у яких можуть формуватися складнопобудовані породи-колектори з тріщинною пористістю.

Доленко, Г. Н., Ризун, Б. П., Сеньковский, Ю. Н. и др. (1980). *Геология и нефтегазоносность Волыно-Подольской плиты*. Киев: Наукова думка.

Дригант, Д. М. (2000). Нижній і середній палеозой Волино-Подільської окраїни Східно-Європейської платформи та Передкарпатського прогину. *Наукові записки Державного природознавчого музею*, *15*, 24–129.

Крупський, Ю. З. (2001). *Геодинамічні формування і нафтогазоносність Карпатського та Волино-Подільського регіонів України*. Київ: УкрДГРІ.

Крупський, Ю. З., Куровець, І. М., Сеньковський, Ю. М., Михайлов, В. А., Чепіль, П. М., Дригант, Д. М. ... Бодлак, В. П. (2014). *Нетрадиційні джерела вуглеводнів України: Т. 2. Західний нафтогазоносний регіон*. Київ: Ніка-Центр.

Куровець, І., Лисак, Ю., Чепусенко, П. (2017). Петрофізична характеристика карбонатних відкладів силуру Волино-Подільської плити. *Геологія і геохімія горючих копалин*, *1–2* (170–171), 79–80.

Куровець, І. М., Наумко, І. М. (2009). Петрофізична і мінералофлюїдологічна характеристика розрізу деяких перспективно нафтогазоносних структур Львівського палеозойського прогину. *Наукові праці УкрНДМІ НАН України*, *5* (ч. 2), 92–98.

Куровець, І., Приходько, О., Грицик, І., Чепіль, П. (2017). Теоретико-експериментальні засади діагностики нетрадиційних покладів вуглеводнів за петрофізичними критеріями. *Геологія і геохімія горючих копалин*, *1–2* (170–171), 82–84.

Лисак, Ю. Є. (2012). Петрофізична характеристика палеозойських відкладів Волино-Подільської окраїни Східноєвропейської платформи. В *Сейсмологічні та геофізичні дослідження в сейсмоактивних регіонах: тези доповідей наукової конференції-семінару, присвяченої 80-річчю з дня народження Тараса Зиновійовича Вербицького (Львів, 29–30 травня 2012 р.)* (с. 92–94). Львів: СПОЛОМ.

Лисак, Ю. Є., Шира, А. І., Кучер, З. І. (2016). Результати статистичного аналізу петрофізичних параметрів відкладів силуру Львівського палеозойського прогину. В *Сучасна геологічна наука і практика в дослідженні студентів і молодих фахівців: матеріали XII Всеукраїнської науково-практичної конференції (Криворізький національний університет, 24–26 березня 2016 р.)* (с. 64–69). Кривий Ріг: Видавничий центр Криворізького національного університету.

Наумко, І. М., Куровець, І. М., Сахно, В. Е., Чепусенко, П. С. (2009). Комплексування мінералофлюїдологічних і петрофізичних методів: нетрадиційний підхід до вивчення порід-колекторів вуглеводнів (на прикладі Львівського палеозойського прогину). *Доповіді НАН України*, *1*, 106–113.

Чиж, Е. И., Ризун, Б. П., Дрыгант, Д. М. (1985). История развития органогенных построек силура и разломная тектоника Волыно-Подолья в связи с нефтегазоносностью. Деп. ИГГГИ, № 125-Б-85. Львов.

Artym, I. V., Kurovets, S. S., Zderka, T. V., Yarema, A. V., & Kurovets I. M. (2019). Development of the rocks fracturing model on the Carpathian region example. In *Theoretical and Applied Aspects Paper presented at the 18th International Conference Geoinformatics (EAGE, May 13–16, Kyiv, Ukraine)*. Retrieved from www.scopus.

Kurovets, I., Drygant, D., Naumko, I., Kurovets, S., & Koltun, Yu. (2012a). Depositional environments of prospective for shale gas Silurian deposits of the East-European Platform, Ukraine. In *Abstracts of the 74th EAGE Conference & Exhibition incorporating SPE EUROPEC 2012 (Copenhagen, Denmark, June 4–7, 2012)* (Extended Abstracts and Exhibitors'catalogue) (CD).

Kurovets, I., Drygant, D., Naumko, I., Kurovets, S., & Koltun, Yu. (2012b). Geological and physical-chemical characteristics of Lower Paleozoic deposits of Volhyno-Podillya, Western Ukraine. *Biulletyn PIG*, *449*, 119–130.

Kurovets, S. S., Artym, I. V., & Kurovets, I. M. (2018). Researching the fracturing of the reservoir rocks. *Journal of Hydrocarbon Power Engineering*, *5* (1), 1–6.

Naumko, I. M., Kurovets', I. M., Zubyk, M. I., Batsevych, N. V., Sakhno, B. E., & Chepusenko, P. S. (2017). Hydrocarbon compounds and plausible mechanism of gas generation in "shale" gas prospective Silurian deposits of Lviv Paleozoic depression. *Geodynamics*, *1* (22), 21–41.

Стаття надійшла:
10.10.2019

**Ihor KUROVETS, Yulia LYSAK, Pavlo CHEPUSENKO,
Stepan MYKHALCHUK, Roman-Danylo KUCHER**

GEOLOGICAL-PETROPHYSICAL CHARACTERISTIC OF SILURIAN DEPOSITS OF THE VOLYN-PODILLYA EDGE OF THE EAST-EUROPEAN PLATFORM

Taking into consideration well logging of the Silurian deposits of the Volyn-Podillya plate, the materials of laboratory investigations of petrophysical parameters of reservoir rocks were analyzed and systematized.

Studied were capacity-filtration properties of reservoir rocks as well as their lithological-petrographical and structural-textural features. An analysis of the distribution of petrophysical parameters of the Silurian deposits of the Volyn-Podillya plate was executed by the methods of mathematic statistics. Main statistics and correlation coefficients between individual parameters were calculated, histograms of the distribution of the porosity factor K_{por} and the permeability factor K_{per}, volumetric weight δ and carbonation C in rocks were compiled, regression equations between parameters and their alteration with depth were formed. Petrophysical parameters of the samples available for carbonate and terrigenous rocks of Silurian were analyzed separately.

Executed investigations of petrophysical properties of rocks testify that in the Silurian deposits the carbonate reservoirs with the complex structure of the porous space were distributed. A visible alteration of capacity-filtration parameters of rocks of Silurian deposits is observed with depth. Porosity of rocks decreases with depth, but permeability increases that is a confirmation of the formation of the secondary fractured-covernous porosity. Increase in the permeability factor with depth is characteristic of carbonate rocks.

According to geological-geophysical data available, the reservoir rocks with better capacity-filtration properties are distributed in the zone of the barrier reef. The best reservoir parameters are characteristic of cavernous dolomites and limestones at the Lokachy area and in the region of Lutsk. Reservoir rocks of porous type are practically absent at depths over 2500 m. Here a significant role in improving of collecting properties of rocks belongs to their fracturing. Microfractures are observed in clayed limestones, marls and clay rocks. Under favourable geodynamic conditions the subvertical zones of disconsolidation occur in which composite reservoir rocks with fracture porosity may be formed.

Keywords: reservoir parameters, Silurian deposits, Volyn-Podillya plate, lithological-petrophysical parameters.