

УДК 550:551.351.2:5783(477)

Наталія РАДКОВЕЦЬ¹, Юрій КОЛТУН²

^{1,2} Інститут геології і геохімії горючих копалин, НАН України, вул. Наукова 3а, м. Львів, 79060, Україна, тел. +38(032)264-97-99, ел. пошта: radkov_n@ukr.net, ¹ <https://orcid.org/0000-0002-1770-6996>, ² <https://orcid.org/0000-0001-9884-5957>

<https://doi.org/doi.org/10.23939/jgd2022.02.0036>

ДИНАМІКА СЕДИМЕНТАЦІЇ В МЕЖАХ ПІВДЕННО-ЗАХІДНОГО СХИЛУ СХІДНОЄВРОПЕЙСЬКОЇ ПЛАТФОРМИ У СИЛУРІ—РАНЬОМУ ДЕВОНІ

Метою даної цієї роботи є вивчення карбонатно-глинистого комплексу осадових порід силуру та нижнього девону (локхівський ярус) південно-західного схилу Східноєвропейської платформи, формування якого стало результатом єдиного циклу геодинамічних та седиментаційних подій в літологічному літописі південної континентальної окраїни Балтики. Методика включає у себе кореляцію геофізичних досліджень свердловин, літологічне та геохімічне вивчення керна матеріалу та петрографічний аналіз порід. Одержані результати використані для встановлення закономірностей зміни речовинного складу досліджених нашарувань у часі й просторі з метою з'ясування динаміки розвитку басейну континентальної окраїни південно-західного схилу Східноєвропейської платформи у силурі—ранньому девоні. Результати. Встановлено, що формування карбонатно-глинистої товщі являє собою єдиний седиментаційний цикл і стало результатом комплексу геодинамічних, седиментаційних та палеокліматичних подій, які мали місце на південній континентальній окраїні Балтики. Для силурійського часу був характерний характерним інтенсивний розвиток бентосних організмів та формування рифових побудов в проксимальній частині басейну і глинисто-карбонатних мулів, збагачених розсіяною органічною речовиною, в його дистальній частині. У ранньому девоні карбонатна біогенна седиментація продовжувалась у межах всього басейну. Максимальний вміст карбонатів (80–98 %) фіксує існування в седиментаційному літописі басейну рифових побудов. Нижчі значення вмісту карбонатів характерні для мергелів (40–55 %) та біодетритових вапняків (56–75 %), які складають основну частину розрізу силуру. У розрізі локхівського ярусу девону рифові побудови відсутні, а вміст карбонату кальцію у породах змінюється від 45 до 83 %. Вміст CaCO_3 в аргілітах та вапнистих аргілітах силуру становить від 5 до 15 %. Наукова новизна. Застосований комплекс літологічних, геохімічних, геолого-геофізичних та палеогеографічних досліджень дозволив вивчити динаміку розвитку дослідженого осадового басейну у силурі—ранньому девоні з оцінкою можливості участі цих нашарувань у генерації нафтових і газових вуглеводнів. Практична значущість. Одержані результати показують, що карбонатно-глинистий комплекс осадових порід силуру та нижнього девону (локхівський ярус) дослідженого регіону може розглядатися, як окрема нафтогазова система, що включає материнські породи, породи-колектори і можливі традиційні та нетрадиційні поклади нафти і газу.

Ключові слова: Україна; силур; девон; шельф Балтики; глинисто-карбонатні нашарування; породи збагачені органічною речовиною; генерація нафти і газу

Вступ

Силурійський період характеризувався розвитком глобальної безкисневої події, результатом якої стало нагромадження потужних осадових товщ, збагачених розсіяною органічною речовиною у межах всіх палеоконтинентів, що викликає інтерес до цих відкладів з точки зору погляду вивчення процесів генерації та акумуляції рідких і газоподібних традиційних і нетрадиційних покладів вуглеводнів. Палеогеографічні умови у в нижньому девоні в у локхівський час у межах дослідженої території були значною мірою успадковані від силурійського періоду, що спричинило нагромадження глинистих мулів зі значним вмістом кар-

бонатної складової та сприяло акумуляції в цих осадах органічної речовини [Radkovets, 2015, Radkovets, 2016]. Тому у цій роботі ми розглядаємо силурійські та нижньодевонські відклади у якості єдиної фаціальної одиниці, яку теж варто розглядати з огляду на перспективи акумуляції рідких і газоподібних традиційних і нетрадиційних покладів вуглеводнів.

Силурійські і девонські відклади сьогодні є основними об'єктами нетрадиційної розробки сланцевого газу та нафти. У північній Америці основні перспективи пов'язані з девонськими і нижньокарбонатними відкладами (девонська формація Босьє у Західному Техасі, міссісіпська формація Барнет басейну Форт Ворс, девонська формація Антрім

мічиганського басейну, девонська формація Огайо апалацького басейну, девонська формація Вудфорд Аркамі), в той час як силурійські є об'єктом нетрадиційної розробки на вуглеводні в Китаї (формація Лонгмаксі басейну Січуань) [Sonnenberg and Pramudito, 2009].

Для з'ясування динаміки розвитку басейну континентальної окраїни південно-західного схилу

Східноєвропейської платформи у силурі–ранньому девоні опрацьовано низку геолого-геофізичних матеріалів та досліджено керновий матеріал (рис. 1). Проведені петрографічні дослідження порід силуру та нижнього девону (локівський ярус) дозволили прослідкувати закономірності зміни речовинного складу цих нашарувань у часі й просторі, та окреслити їхні нафтогенераційні перспективи.



Рис. 1. Карта поширення відкладів силуру та локівського ярусу нижнього девону в межах південно-західного схилу Східноєвропейської платформи [Radkovets, 2015, Radkovets, 2016]:

Свердловини: Bch – Бучач; Bd – Бридок; Bl – Балучин; Blb – Балабанівськ; Br – Броди, Bsh – Бишів, Bt – Берестечко; Bzh – Бережани; Chr – Чернівці; Db – Дубляни; Dr – Дарахів; Drb – Дарабані; Gl – Глиняни; Gr – Горохів; Gt – Гиртоп; Gu – Гулянка; Hr – Горів; IvF – Івано-Франківськ; Iv – Іванешті; Is – Яси; Khm – Хмельівка; Km – Кременець; Kp – Конопківка; Kp – Коропець-Пишківці; Kr – Крехів; Ksh – Кишинів; Lk – Локачі; Lm – Лиман; Ls – Ліщини; Lt – Літовеж; Ltn – Літені; Lts – Луцьк; Mn – Мирне; NV – Новий Витків; Og – Оглядів; Ol – Олесько; P – Валя-Пержей; Pch – Повча; Pd – Підбереззя; Pg – Підгайці; Pl – Палтініс; Pr – Перемишляни; PU – Попесті-Унгені; Rg – Рогатин; Rm – Роман; RR – Рава-Руська; Sc – Сучава; Sg – Сергіївка; Sk – Сокаль; Sr – Сарата; Ssh – Сушне; St – Стремін; Td – Тодірені; TK – Тлумач-Коломия; Vch – Верхняківці; VI – Володимирівка; VIV – Володимир-Волинський; VM – Великі Мости; Vg – Ворона; Vt – Воютин; Yr – Яргара; Zch – Золочів; Zg – Загорів; Zl – Заложці; Zp – Загайпіль; Zv – Завадівка

Геологічна будова та поширення відкладів

Південно-західний схил Східноєвропейської платформи, який є об'єктом цього дослідження, складається з таких геологічних структур: Волино-Подільська плита, Молдовська платформа та Переддобрудзький прогин (рис. 1). Архейсько-протерозойський фундамент зазначеної території представлений магматичними і метаморфічними породами та перекривається осадовим чохлам, складеним відкладами неопротерозою (рифей, венд), палеозою (кембрій, ордовик, силур, девон, карбон, перм поширена лише у Переддобрудзькому прогині), мезозою (тріас – виключно в Переддобрудзькому прогині), юра, крейда) і кайнозою (палеоген, неоген, антропоген) [Гнідець та ін,

2003]. Фундамент виходить на денну поверхню в області Українського щита, а в напрямку зі сходу на захід від щита до зони ТТ (Тейсейре–Торнквіста) поверхня фундаменту моноклінально занурюється під осадову товщу. Відповідно, як продемонстровано на геологічному перетині (рис. 2), товщина осадового чохла збільшується з північного сходу на південний захід. Найбільші товщини осадової товщі встановлені у межах Волино-Подільської плити та Переддобрудзькому прогині. За даними геофізичних досліджень максимальні значення, що досягають 10 км, фіксуються у крайній південно-західній частині Львівського прогину [Чебаненко та ін., 1990]. У найбільш зануреній частині Переддобрудзького прогину товщина осадової товщі сягає 7 км.

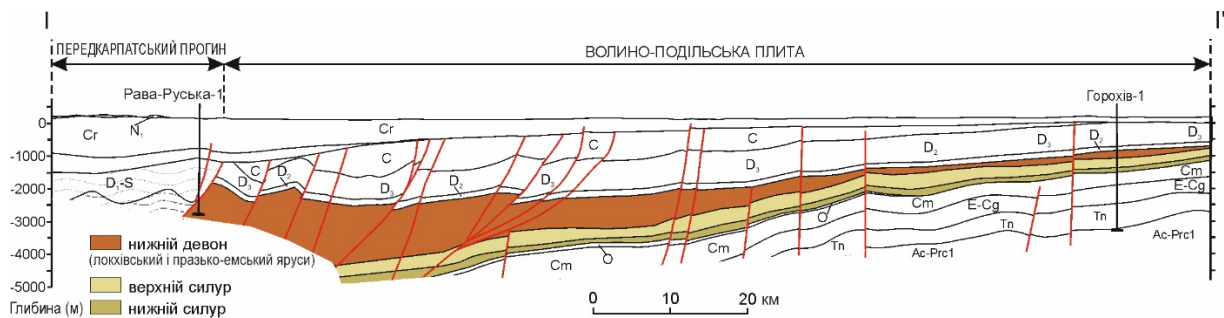


Рис. 2. Геологічний перетин по лінії А – А' через Передкарпатський прогин і Волино-Подільську плиту (див. рис. 1) модифіковано за [Ващенко та ін., 2007]:

Ac – архей, Ac-Prc₁ – архей і нижній протерозой, Тп – тоній, Е-Сг – криогенній-едіакар, Рс-См – докембрій-кембрій, См – кембрій, О – ордовік, S-D₁ – силур і нижній девон нерозчленований, D₁ – нижній девон, D₂ – середній девон, D₃ – верхній девон, С – місісіпій і пенсильваній, J – юра, Сг – крейда, N₁ – міоцен

Відклади силуру та нижнього девону (лохівський ярус) становлять єдиний осадовий цикл. Вони поширені суцільним пасмом вздовж південно-західної окраїни Східноєвропейської платформи від Балтійського до Чорного моря і залягають на розмитій під час тривалої регресії поверхні ордовіку, кембрію і венду. Товщини силуру та нижнього девону (лохівський ярус) закономірно зростають від Українського щита на захід в напрямку зони ТТ. Як продемонстровано на рис. 3, нашарування силуру на ділянці найбільшого занурення платформи сягають 1100 м і більше. Відклади девону в межах території досліджень значно менше поширені, аніж відклади силуру, проте вони теж на ділянці, наближеній до зони ТТ, мають максимальні товщини, які становлять у Переддобрудзькому прогині 800 м, а в межах Волино-Подільської плити більше 1000 м. Відклади силуру представлені обома відділами – нижнім і верхнім (Никифорова и др., 1972; Дригант, 2000).

Нижній відділ силуру, який представлений глинисто-карбонатними нашаруваннями, охоплює лише венлокський ярус (рис. 4). Верхній відділ складений повним віковим відрізком, лудловським і пржидольським ярусами, які за літологічним складом, загалом, представлені карбонатно-глинистими породами. Відклади девону в межах дослідженого регіону представлені всіма трьома відділами: нижнім, середнім та верхнім (Дригант, 2000). Нижній відділ представлений двома різними як за складом, так і за фаціальними особливостями товщами. Нижня частина розрізу, (лохівський ярус) за своїми петрографічними характеристиками майже не відрізняється від силурійських нашарувань. Лохківські відклади – це глинисто-карбонатні породи зі значним вмістом карбонатів. Верхня частина нижньодевонського розрізу (празький та емський яруси) представлена зовсім іншими за генезисом породами – червонувато-коричневими теригенними нашаруваннями, віковим аналогом континентальних відкладів девону, так званих «Old Red Sandstones».

Мета

Метою цієї роботи є дослідження карбонатно-глинистого комплексу осадових порід силуру та нижнього девону (локхівський ярус) південно-західного схилу Східноєвропейської платформи, формування якого стало результатом єдиного циклу геодинамічних та седиментаційних подій в літологічному літописі південної континентальної окраїни Балтики.

Методологія

Методика включає у себе кореляцію геофізичних досліджень свердловин, літологічні та геохімічні дослідження керна матеріалу та петрографічний аналіз порід. Одержані результати використані для встановлення закономірностей зміни речовинного складу досліджених на шарувань у часі й просторі з метою з'ясування динаміки розвитку басейну континентальної окраїни південно-західного схилу Східноєвропейської платформи у силурі–ранньому девоні.

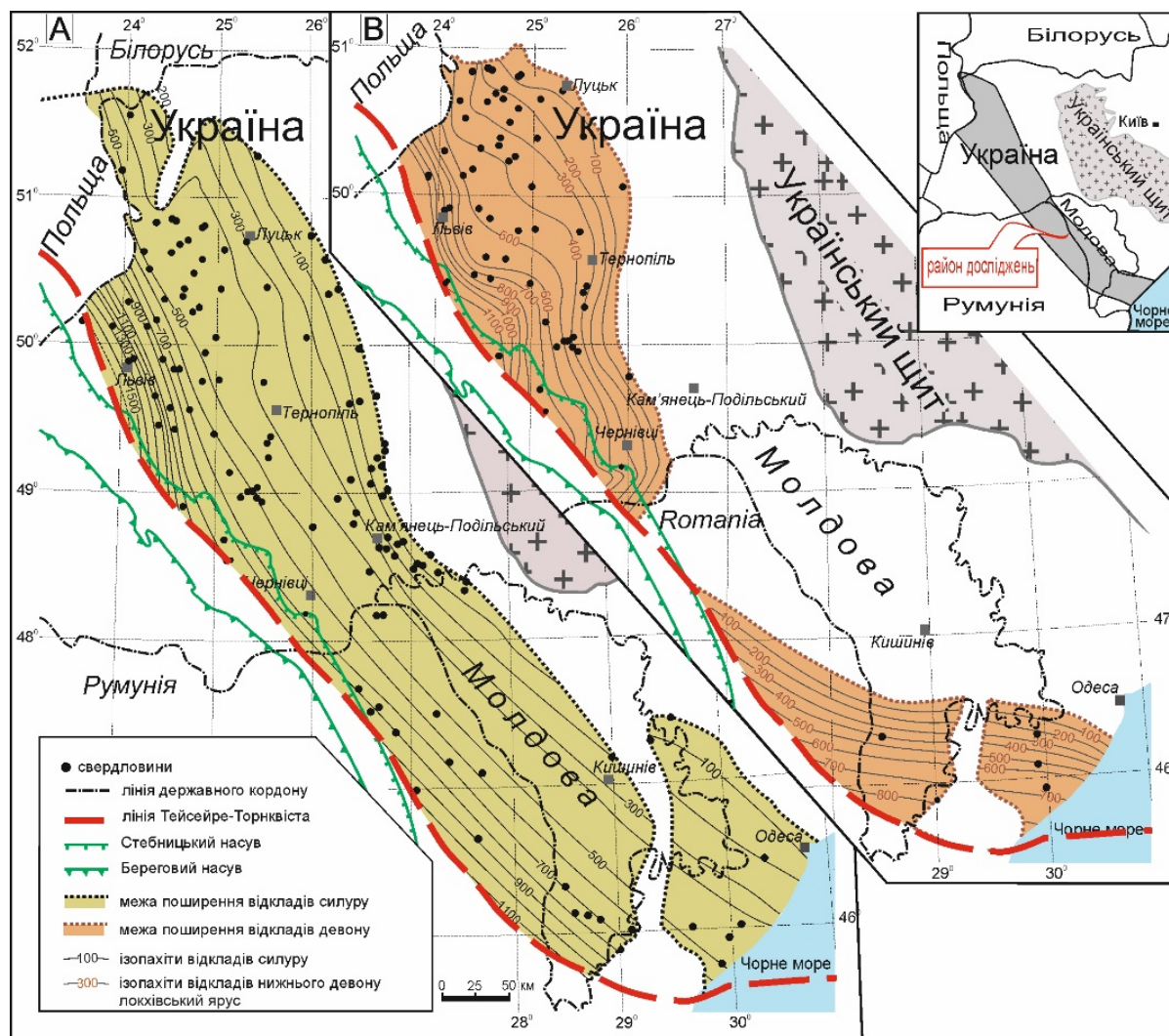


Рис. 3. Карти товщин: (А) силуру та (Б) локхівського ярусу нижнього девону в межах південно-західного схилу Східноєвропейської платформи [Radkovets, 2015, Radkovets, 2016]

Результати

Літологічна характеристика порід

Літологічні перетини (рис. 4) нашарувань силуру, для побудови яких проведена кореляція геофізичних досліджень свердловин та петрографічний аналіз порід, показують характерну зміну фацій в напрямку від прибережної до глибоководнішої частини басейну. У прибережній зоні переважала біогенна седиментація з нагромадженням карбонатних мулів з незначною домішкою глинистої складової, а також відбувався інтенсивний розвиток бентосних організмів та формування рифових побудов. Глибоководніша частина басейну характеризувалась надходженням глинистого матеріалу та формуванням глинисто-карбонатних мулів. Як видно з рис. 4, інтенсивне карбонатнагромадження карбонату було притаманне для всього дослідженого басейну, однак в глибоководнішій частині на фоні нагромадження карбонатних мулів відбувалося регулярне привнесення

глинистого матеріалу, результатом чого стало формування в розрізі силуру потужних товщин аргілітів та вапнистих аргілітів. У зв'язку з існуванням у глибоководнішій частині зони кисневого мінімуму, глинисті нашарування збагачувались розсіяною органічною речовиною. Не зважаючи на те, що відклади локхівського ярусу нижнього девону становлять єдиний седиментаційний цикл з відкладами силуру, біогенна седиментація продовжувалась у межах всього басейну, але у глибоководнішій частині не відбувалося інтенсивного надходження глинистого матеріалу, тому ці відклади представлені біодетритовими і доломітизованими вапняками з прошарками мергелів, без фаціальних зон, які існували у силурійський час [Radkovets, 2015].

Результати вивчення петрографічного складу силурійських та нижньодевонських (локхівський ярус) порід, які дозволили здійснити вибір характерних типів порід з різних частин дослідженої території (рис. 1), подані у табл. 1.

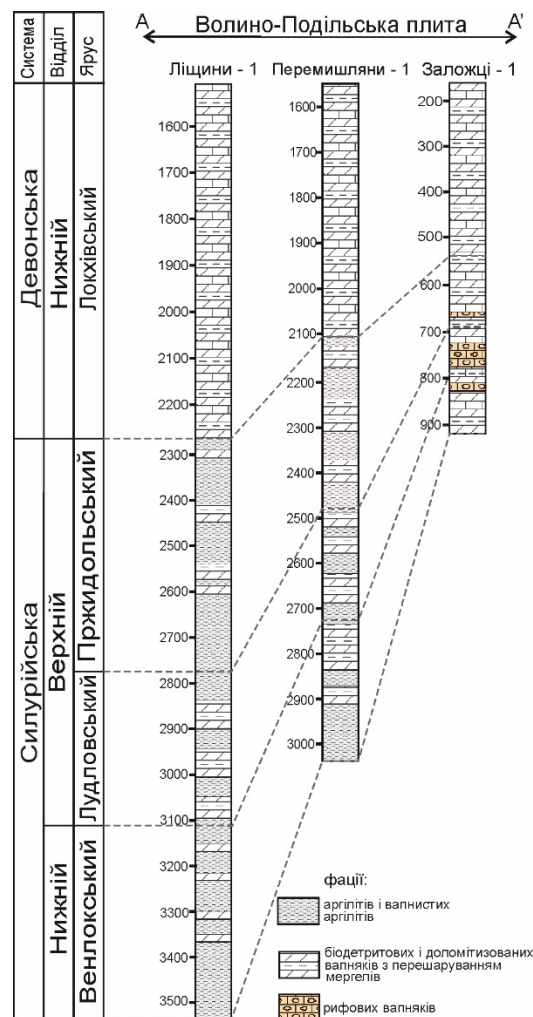


Рис. 4. Літологічний перетин А-А' силуру та локхівського ярусу нижнього девону Волино-Подільської плити (див. рис. 1)

Таблиця 1

Петрографічний склад силурійських та нижньодевонських (локхівський ярус) порід

Стратиграфія	Літологія	Мінеральний склад порід, %			
		Глинисті мінерали	Кварц	Польові шпати	Карбонати
Нижній девон Локхів	мергелі	$\frac{17-21}{20,6}$	$\frac{21-28}{27}$	$\frac{0,07-2}{2,6}$	$\frac{45-62}{60}$
	біодетритові та доломітизовані вапняки	$\frac{8-12}{6}$	$\frac{0,7-3,6}{2,6}$	$\frac{0,7-2}{1,6}$	$\frac{68-98}{81}$
Силур	аргіліти	$\frac{24-36}{29}$	$\frac{41-64}{59}$	$\frac{3-6}{6}$	$\frac{4-6}{6}$
	вапнисті аргіліти	$\frac{22-45}{29}$	$\frac{45-68}{57}$	$\frac{3-6}{4,6}$	$\frac{6-16}{10,6}$
	глинисті мергелі	$\frac{20-31}{26}$	$\frac{36-48}{48}$	$\frac{3-6,6}{4,1}$	$\frac{16-40}{31}$
	мергелі	$\frac{16-28}{17}$	$\frac{28-38}{29}$	$\frac{2-3,6}{3}$	$\frac{40-65}{61}$
	глинисті біодетритові вапняки	$\frac{6,6-10}{8}$	$\frac{7-16}{14,6}$	$\frac{0,6-2}{1,6}$	$\frac{66-79}{77}$
	рифові вапняки	$\frac{1-7}{4}$	$\frac{2-11}{6,6}$	$\frac{0,6-1}{0,7}$	$\frac{80-98}{92}$

У чисельнику – діапазон вмісту мінералів у породи, у знаменнику – середні значення вмісту мінералів у породи

Породи силуру та нижнього девону (локхівський ярус), які відображають процеси нагромадження карбонату впродовж цього вікового проміжку в дослідженому басейні, представлені фацією біодетритових і доломітизованих вапняків з прошарками мергелів (рис. 5, А–Д). Як глинисті мергелі, так і мергелі, що складаються з тонкодисперсної глинисто-карбонатної речовини, завжди містять кварц тонкоалевритової розмірності, який у середньому становить у глинистих мергелях 43 %. Також у породах присутні карбонатні скелетні рештки 0,1–0,8 мм (інколи >1 мм), які часто є сильно перекристалізованими. Крім того, мергелі піритизовані та містять значну кількість лінзовидних скупчень органічної речовини. Біодетритові і доломітизовані вапняки містять від 55 % до 85 % CaCO_3 та $\text{CaMg}(\text{CO}_3)_2$, та представлені обкатаними і необкатаними рештками рифових організмів з глинистим цементом.

Відклади силуру, які формувались у глибоководній частині за рахунок надходження глинистого матеріалу у седиментаційний басейн, представлені фацією аргілітів і вапнистих аргілітів (рис. 6, А, Б). Цемент у породах складається з іліту, хлориту, дрібних лусок слюди та субпаралельних прошарків органічної речовини, яка у цій фації досягає максимальних значень (до 2,16 ваг.% %).

Рифопобудови, які були притаманні для прокимальної частини басейну у силурійський час, представлені фацією рифових вапняків (рис. 7, А, Б). Породи у значних кількостях містять скелетні уламки, серед яких переважають водорості, остракоди, брахіоподи та корали. Найвищі значення вмісту CaCO_3 встановлено у рифових вапняках (до 98 %). Формування рифової фації почалося у венлоку. Ця фація утворила межу, за якою відкладалися глибоководні глинисті нашарування [Radkovets, 2015].

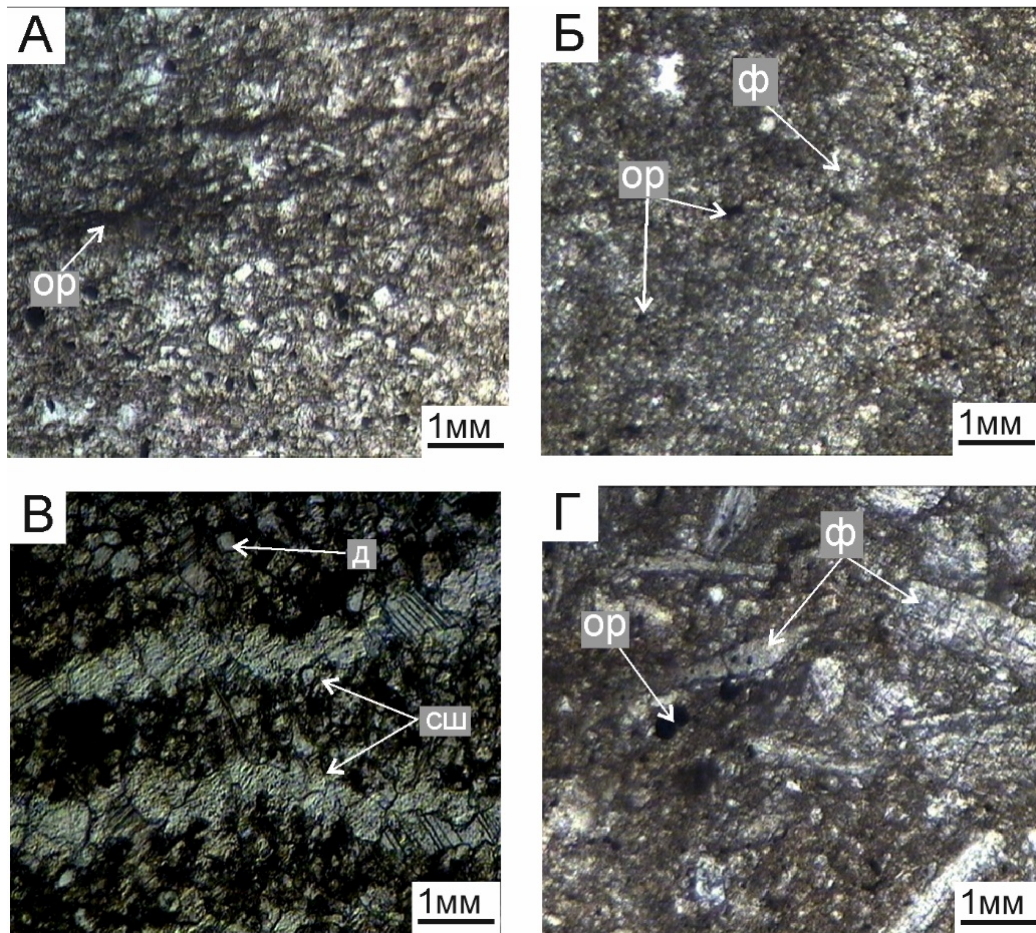


Рис. 5. Мікрофотографії:

А – мергель, свердловина Крехів-1, інтервал глибин 3405,1–3414,7 м, нижній девон (локхівський ярус); Б – мергель, свердловина Заложці-1, інтервал глибин 808,8–813,5 м, силур; В – доломітизований вапняк, свердловина Лиман-1, інтервал глибин 2170–2180 м, нижній девон (локхівський ярус); Г – глинистий біодетритовий вапняк, свердловина Бучач-1, інтервал глибин 1075–1080 м, силур: ф – фрагменти карбонатної фауни, д – зерна доломіту, ор – органічна речовина, сш – стилітові шви

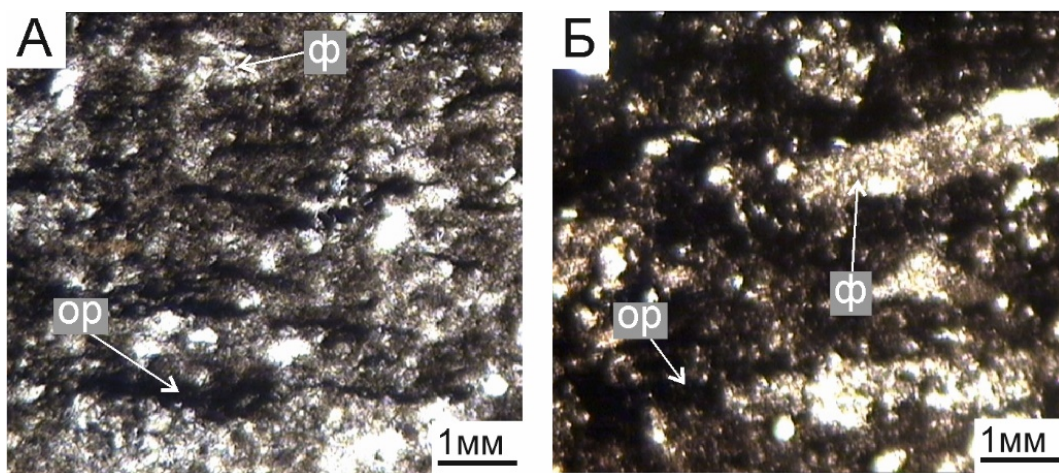


Рис. 6. Мікрофотографії силурійських порід:

А – аргіліт, свердловина Крехів-1, інтервал глибин 4560–4565 м; Б – вапнистий аргіліт, свердловина Крехів-1, інтервал глибини 4406,7–4412,2 м: ф – фрагменти карбонатної фауни, ор – органічна речовина

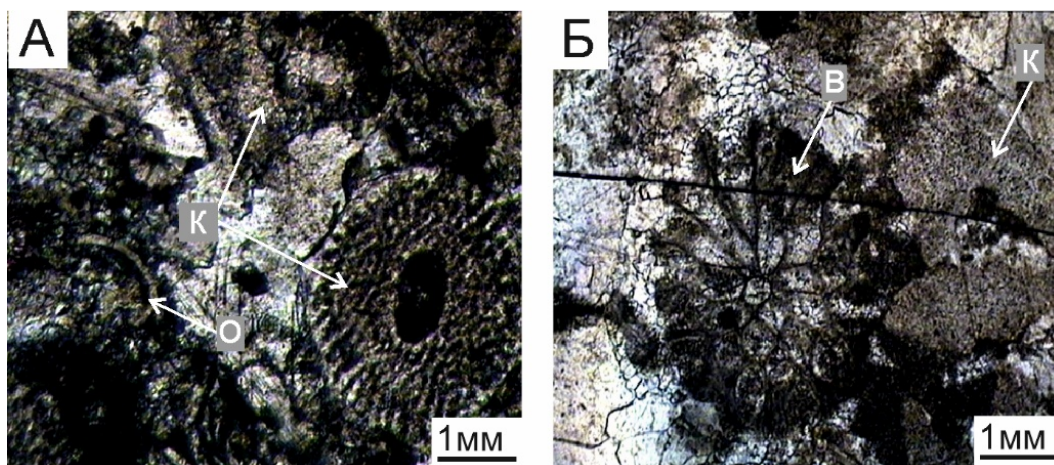


Рис. 7. Мікрофотографії силурійських рифових вапняків:

А – свердловина Лиман-1, інтервал глибин 2707–2713 м; Б – свердловина Заложці-1, інтервал глибини 729–761 м: в – водорості, к – корали, о – остракоди

Отже, для дистальної частини басейну у силурійський час було характерним нагромадження глинистих мулів. Вміст CaCO_3 в аргілітах та вапнистих аргілітах становить від 5 до 15 %. Відклади силуру та нижнього девону (локхівський ярус), які нагромаджувались у менш зануреній частині басейну, характеризуються підвищеним вмістом карбонату кальцію у всьому розрізі. Рис. 8 показує вміст CaCO_3 у розрізі дослідженого часового інтервалу для свердловини Лиман-1, яка є типовою для всієї проксимальної частини седиментаційного басейну (Волино-Подільська плита, Молдовська платформа, Переддобрудзький прогин), у якій було обмежене надходження глинистого матеріалу, і тому у відкладах силуру вміст CaCO_3 змінюється від 40 до 98 %. Максимальний вміст карбонатів (80–98 %) фіксує існування в седиментаційному літописі басейну рифових побудов. Нижчі значення вмісту карбонатів характерні для мергелів (40–55 %) та біодетритових вапняків (56–83 %), які становлять основну частину розрізу силуру. У розрізі локхівського ярусу девону рифові побудови відсутні, а вміст карбонату кальцію у породах змінюється від 45 до 83 %.

Геодинамічні фактори та умови седиментації на південному шельфі Балтики

Геодинамічна еволюція

Досліджений регіон знаходиться на південно-західному схилі Східноєвропейської платформи на заході обмежується лінією Тейсейре–Торнквіста, а на сході межує з Українським щитом. У силурі (рис. 9, А) та ранньому девоні (рис. 9, Б) досліджуваний басейн являв собою південний шельф континенту Балтика. Внаслідок глобальних тектонічних подій в ордовіку [Verniers et al., 2008]

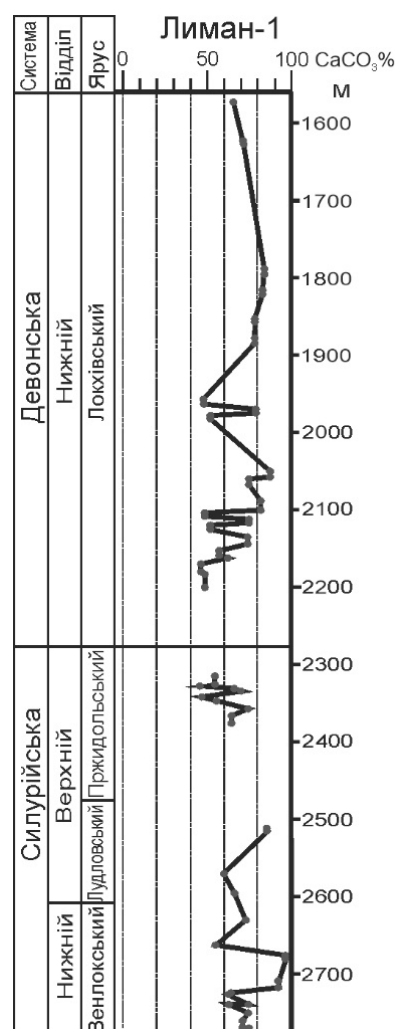


Рис. 8. Вміст CaCO_3 у розрізі силуру та локхівського ярусу нижнього девону, свердловина Лиман-1 (Переддобрудзький прогин)

досліджений регіон був виведений з-під рівня моря, що спричинило перерву в осадонагромадженні осаду у в цей віковий відтинок в осадовому розрізі західної окраїни Східноєвропейської платформи. У пізньому ордовіку відбулася зміна геодинамічного режиму дослідженого регіону зі стадії пострифтового термального занурення на колізійну. Новий седиментаційний басейн, який становив флексурний передовий прогин, пов'язаний із каледонською косою колізією Авалонії і Балтики, існував від початку венлокського часу силуру до локхівського часу раннього девону включно [Poręba et al., 2018]. У пражко-емський час (нижній девон) внаслідок зіткнення Балтики з Лаврусією відбувся акадійсько-каледонський орогенез, і басейн перейшов у постколізійну стадію [Golonka and Gawęda, 2012].

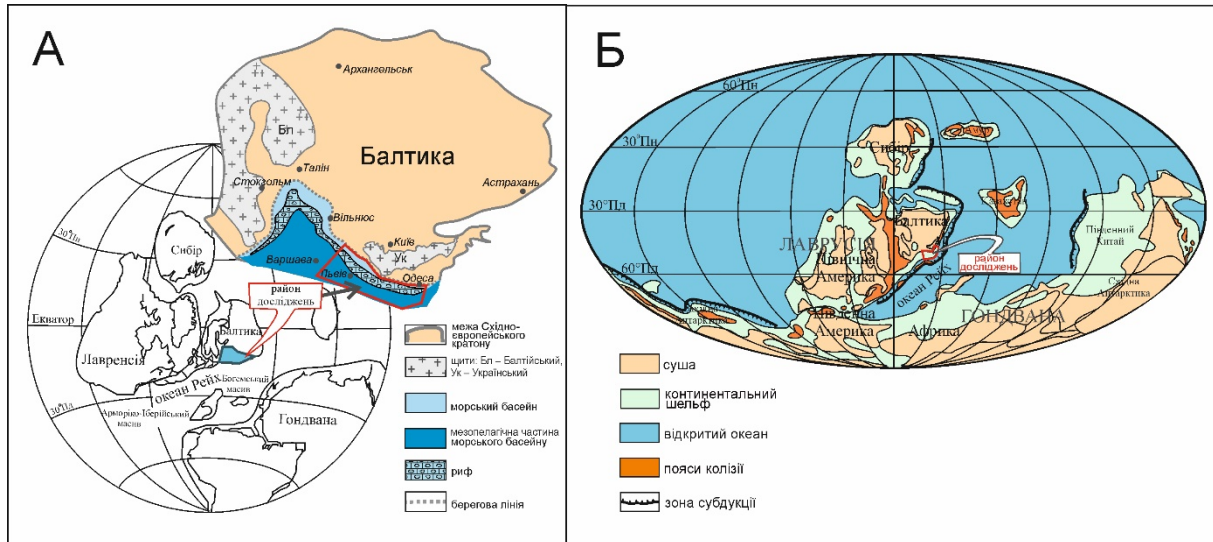


Рис. 9. Палеогеографічні карти: А – силур за [Torsvik et al., 1996] та модель південного шельфу Балтики з розташуванням літофацій для лудловського часу за [Radkovets, 2015]; Б – ранній девон за [Golonka and Gawęda, 2012]

Умови седиментації

Після ордовіцького зльоденіння зледеніння клімат дослідженої території стрімко змінився внаслідок парникового ефекту. Рис. 10 показує зміну температурного режиму та рівня моря у глобальному масштабі і зокрема – у межах південного шельфу Балтики впродовж силуру–раннього девону. Температура поверхневих морських вод у силурі перевищувала 20 °C [Verniers et al., 2008], а у локхівський час раннього девону становила понад 30 °C [Kiessling, 2002, Kiessling et al., 2003]. Такі кліматичні умови сприяли інтенсивному карбонату нагромадженню карбонату у шельфових осадах дослідженого басейну (рис. 9).

Для периферичної частини басейну були характерні характерними карбонатні осади сформовані бентосними організмами, результатом чого у силурі стало інтенсивне рифоутворення (рис. 9, А). У глибшій частині шельфу (на глибинах понад 100 м) існувала зона кисневого мінімуму, в межах якої завдяки ефективній фосилізації планктонних організмів нагромаджувались карбонатні мули, збагачені органічною речовиною.

Палеоконтинент Лаврусія, який складався з Північної Америки і Балтики (рис. 9, Б) був місцем, де в силурі–девоні нагромаджувалися збагачені розсіяною органічною речовиною мули. На сучасному північноамериканському континенті знаходяться потужні товщі чорносланцевих відкладів девону, які сьогодні являють собою найбільші у світі родовища сланцевого газу і нафти та ефективно розробляються у США [Sonnenberg and Pramudito, 2009].

Досліджені нами відклади силуру–раннього девону нагромаджувались на південній континентальній окраїні Балтики у результаті існування там зони кисневого мінімуму. У девонський час ця зона мігрувала у мілководний морський басейн, що існував у межах Лаврусії між континентами Північна Америка і Балтика, що призвело до нагромадження вищезгаданих вище чорносланцевих товщ.

Розвиток рифопобудов у силурі (пізній венлок–середній пржидол) вздовж всієї епіконтинентальної південної окраїни Балтики спричинився до утворення бар'єрного рифу (рис. 9, А). Протяжність рифу становила близько 2300 км, а макси-

мальна ширина – 150 км. Силурійське рифове пасмо за аналогією з сучасним Австралійським можна назвати «великий бар'єрний силурійський риф». Між цими рифами виявлено цікаву низку співпадінь. Насамперед це широти, адже південний палеошельфовий басейн палеоконтиненту Балтика, де відбувалось рифоутворення, як і сучасний східний шельф Австралії, де розвивається Великий бар'єрний риф, знаходився в південних широтах (10–25°), наступне, – це розміри «тіла» рифу як силурійського, так і сучасного Великого бар'єрного, які співпадають (максимальна ширина – 150 км, довжина 2300 км), ще один фактор, який є притаманним для карбонатагромадження карбонату – це температура. Сучасні температури у межах східного шельфу Австралії становлять 22–27 °C, за даними [Verniers et al., 2008] в межах дослідженого палеобасейну в силурійський час температура була не меншою (22 °C). І останній цікавий факт: площа Австралії і та площа палеоконтиненту Балтики теж наближено співпадають ($\approx 7\,600$ тис. км²).

У локхівський час не відбулося істотної зміни кліматичних та тектонічних умов, вони залишались такими ж, як у пізньому силурі, інтервалу інтервали геологічної історії, для якого був притаманний теплий клімат з високим вмістом в атмосфері і в океанічній воді CO₂ [Royer, 2006]. Незважаючи на поступове підвищення рівня моря (рис. 10), локхівський час характеризувався сприятливим середовищем для розвитку карбонатного біоценозу та осадоагромадження глинисто-карбонатних відкладів. В локхівський час рифоутворення припинилося. Епіконтинентальний басейн являв собою типову карбонатну платформу, в межах якої розвивався різноманітний карбонатний біоценоз. Рясний розвиток карбонатної фауни сприяв осадоагромадженню осаду відкладів зі значним вмістом CaCO₃, максимальний вміст якого в породах досягає 83 %.

Отже, після ордовикського зледеніння у силурі та нижньому девоні (локхівський час) в умовах парникового ефекту (рис. 10) проіснував басейн з інтенсивним нагромадженням карбонату та зоною кисневого мінімуму. Внаслідок зниження швидкості тектонічного занурення та зміни клімату у празький час осадовий басейн зменшив свої розміри, нагромадження карбонатів припинилося, натомість почалося теригенне осадоагромадження.

Перспективи нафтогазоносності

Карбонатно-глинистий комплекс осадових порід силуру та нижнього девону (локхівський ярус)

Східноєвропейської платформи становить певний інтерес з погляду перспектив нафтогазоносності, і може розглядатися як окрема нафтогазова система, що включає материнські породи та породиколектори і можливі традиційні та нетрадиційні поклади нафти і газу. Силурійські відклади, які включають потужні нашарування глинисто-карбонатних порід, збагачених розсіяною органічною речовиною, розповсюджені на величезній території від Балтійського до Чорного моря, впродовж останнього десятиліття розглядалися як об'єкт для пошуків сланцевого газу [Poprawa, 2020; Sachsenhofer and Koltun, 2011].

Сьогодні економічна рентабельність розробки нетрадиційних вуглеводнів у відкладах силуру не підтверджена, хоча подальші дослідження у цьому напрямку тривають. Середній вміст органічного вуглецю в аргілітах силуру становить 0,8 ваг.%, але локально досягає значень 2,16 ваг.% [Radkovets et al., 2017a]. Беручи до уваги значну товщину цієї чорносланцевої товщі, яка перевищує 1300 м, подальші дослідження можуть показати перспективність розрізу силуру для пошуків нетрадиційних вуглеводнів.

У північно-східній частині дослідженого регіону, де відклади силуру залягають на невеликих глибинах і, відповідно, мають меншу термальну зрілість, можна очікувати поклади сланцевої нафти. У південно-західному напрямку ці відклади досягають більших глибин і вищої термальної зрілості, а отже, можуть бути перспективними на сланцевий газ. Силурійські рифові побудови є перспективними на традиційні нафтові поклади. Численні нафтопрояви зафіксовані у низці свердловин, зокрема на площі Локачі [Чиж, 1977, Різун та ін, 2007].

Карбонатно-глинисті відклади локхівського ярусу нижнього девону Волино-Подільської плити, як показали одиночні заміри, мають невисокий вміст C_{орг}, що становить 0,2 ваг.% [Radkovets et al., 2017b]. Однак, дослідження цих відкладів у Люблінському прогині, які нагромаджувались у тому ж осадовому басейні і являють собою одну й ту ж фацію, показали вміст C_{орг} в породах до 1,8 ваг.%, що дозволяє припустити можливість локальної участі цих порід разом із силурійськими чорносланцевими відкладами в процесах генерації вуглеводнів, які акумулювалися у залягаючій вище теригенній строкатоколірній товщі пражського ярусу нижнього девону. Зокрема, такий продуктивний горизонт виявлено на Локачівській площі [Крупський та ін., 2014].

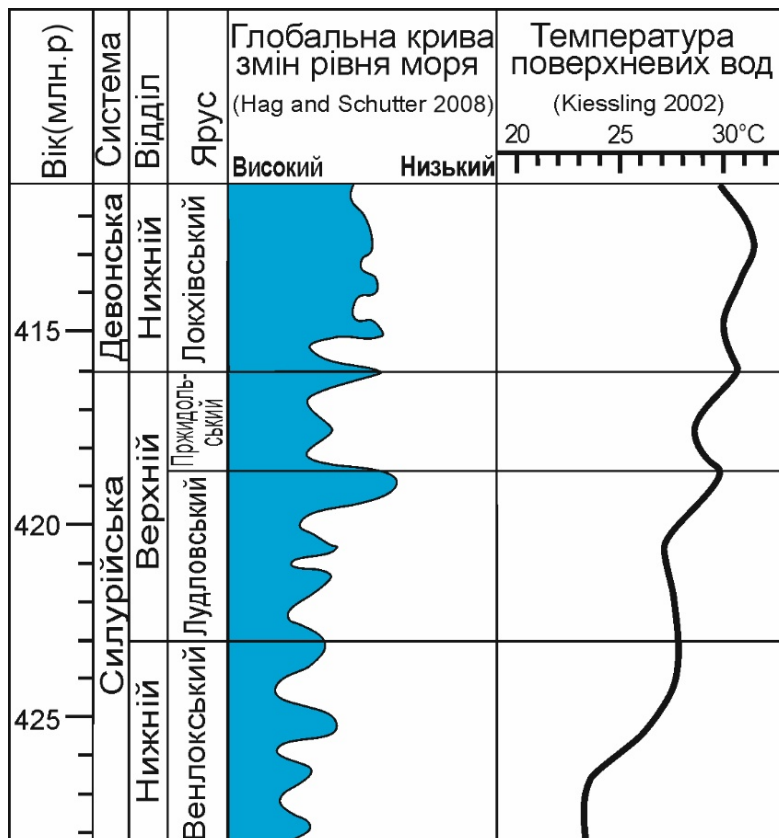


Рис. 10. Глобальна крива змін рівня моря та палеотемператури поверхневих вод для силуру та локхівського часу нижнього девону

Наукова новизна

Застосований комплекс літологічних, геохімічних, геолого-геофізичних та палеогеографічних досліджень дозволив вивчити динаміку розвитку дослідженого осадового басейну у силурі–ранньому девоні з оцінкою можливості участі цих нашарувань у генерації нафтових і газових вуглеводнів.

Практична значущість

Одержані результати показують, що карбонатно-глинистий комплекс осадових порід силуру та нижнього девону (локхівський ярус) дослідженого регіону може розглядатися, як окрема нафтогазова система, що включає материнські породи, породи-колектори і можливі традиційні і нетрадиційні поклади нафти і газу.

Висновки

Формування осадової товщі силуру–нижнього девону (локхівський ярус) стало результатом комплексу геодинамічних, седиментаційних та палеокліматичних подій, що мали місце на південній континентальній окраїні Балтики. Досліджені карбонатно-глинисті нашарування являють собою

єдиний седиментаційний цикл, який містить потужні чорносланцеві нашарування та біогенні карбонатні утворення. Зміна геодинамічного режиму у в силурі зі стадії пострифтового термального занурення на колізійну спричинила формування нового седиментаційного басейну, який існував від початку венлокського часу силуру до локхівського часу раннього девону включно і становив флексурний передовий прогин.

У силурі в проксимальній частині басейну відбувався інтенсивний розвиток бентосних організмів та формування рифових побудов. У дистальній частині басейну на фоні інтенсивного карбонатонагромадження мало місце надходження глинистого матеріалу та формуванням глинисто-карбонатних мулів. У результаті глобального парникового ефекту в глибоководнішій частині розвинулась зона кисневого мінімуму, де глинисто-карбонатні мули збагачувались розсіяною органічною речовиною з формуванням чорносланцевих нашарувань. Карбонатна біогенна седиментація продовжувалась у межах всього басейну і у нижньому девоні (локхівський ярус), але у дистальній частині не відбувалося інтенсивного надходження глинистого матеріалу, тому ці відклади представлені виключно біодетритовими і

доломітизованими вапняками з прошарками мергелів.

Карбонатно-глинистий комплекс осадових порід силуру та нижнього девону (лохівський ярус) дослідженого регіону може розглядатися, як окрема нафтогазова система, що включає материнські породи та породи-колектори і можливі традиційні та нетрадиційні поклади нафти і газу. Хоча на сьогоднішній день економічна рентабельність розробки нетрадиційних вуглеводнів у відкладах силуру не підтверджена у зв'язку з невисоким середнім вмістом C_{org} у породах, проте, значна товщина цієї чорносланцевої товщі дозволяє розглядати її як перспективну на сланцеву нафту у північно-східній частині дослідженого регіону, де відклади силуру залягають на невеликих глибинах і, відповідно, мають меншу термальну зрілість, і перспективну на сланцевий газ у більш зануреній частині платформи. Карбонатно-глинисті відклади лохівського ярусу нижнього девону могли брати локальну участь разом із силурійськими чорносланцевими відкладами у процесах генерації вуглеводнів, які акумулювалися у залягаючій вище теригенній строкатоколірній товщі празько-емського ярусу нижнього девону.

Список літератури

- Вашенко В. О., Турчинова С. М., Турчинов І. І., Поліка Г. Г. Державна геологічна карта України масштабу 1:200 000, аркуш М-35-XXV (Івано-Франківськ) Карпатська серія. Пояснювальна записка. К.: УкрДГРІ, 2007, 150 с., карта – 4 листи.
- Гнідець, В. П., Григорчук, К. Г., Полухтович, Б. М., Федішин, В. О. Літогенез девонських відкладів Придніпровського прогину (палеоокеанографія, седиментаційна циклічність, формування порід-колекторів) : моногр. Л.: УкрДГРІ, 2003. 85 с.
- Дригант Д. М. Нижній і середній палеозой Волино-Подільської окраїни Східноєвропейської платформи та Передкарпатського прогину. Наукові записки Державного природознавчого музею, 2000. Вип. 15. 24–87.
- Крупський Ю. З., Куровець І. М., Сеньковський Ю. М., Михайлов В. А., Куровець С. С., Бодлак В. П. Нетрадиційні джерела вуглеводнів України. У: 8 кн. Кн. 2. Західний нафтогазоносний регіон. К.: Ніка-Центр, 2014, 400 с. <http://elar.nung.edu.ua/handle/123456789/5152>.
- Никифорова О. И., Предтеченский Н. Н., Абушик А. Ф., Игнатович М. М., Модзалевская Т. Л., Бергер А. Ю., Новоселова Л. С., Бурков Ю. К. Опорный разрез силура и нижнего девона Подолии. Ленинград: Наука, 1972. 262 с.
- Різун Б., Павлюк М., Медведєв А., Кінах М. Силурійські поховані рифи Волино-Поділля в контексті перспектив нафтогазоносності. *Геологія і геохімія горючих копалин*, 2007. № 4, 5–25.
- Чебаненко И. И., Вишняков И. Б., Власов Б. И. *Геотектоника Волино-Подолья* : моногр. К.: Наукова думка, 1990. 244 с.
- Чиж Е. И. Изучение ископаемых органогенных построек силура Волино-Подолья. *Геологический журнал*, 1977. Вып. 37. С. 101–108.
- Golonka J., Gawęda A. (2012). Plate tectonic evolution of the southern margin of Laurussia in the Paleozoic. In E. Sharkov (Ed.), *Tectonics – recent advances*. Pp. 261–282. InTech. <https://www.intechopen.com/chapters/37859>.
- Kiessling W. (2002). Secular variations in Phanerozoic reef ecosystem. In *Phanerozoic Reef Patterns* (Vol. 72. Pp. 625–690). SEPM: Special Publication. <https://doi.org/10.2110/pec.02.72.0625>.
- Kiessling W., Flügel E. & Golonka J. (2003). Patterns of Phanerozoic carbonate platform sedimentation. *Lethaia*, 36, 195–226. DOI: <https://doi.org/10.1080/00241160310004648>.
- Poprawa P. (2020). Lower Paleozoic oil and gas shale in the Baltic-Podlasie-Lublin Basin (central and eastern Europe) – a review. *Geological Quarterly*, 64 (3), 515–566. DOI: <https://doi.org/10.7306/gq.1542>.
- Poprawa P., Radkovets N. & Rauball J. (2018). Ediacaran-Paleozoic subsidence history of the Volyn-Podillya-Moldavia basin (W and S Ukraine, Moldavia, NE Romania). *Geological Quarterly*, 62 (3), 459–486. DOI: <https://doi.org/10.7306/gq.1418>.
- Radkovets N. (2015). The Silurian of South-Western margin of the East European Platform (Ukraine, Moldova and Romania): lithofacies and palaeoenvironments. *Geological Quarterly*, 59 (1), 105–118. DOI: <https://doi.org/10.7306/gq.1211>.
- Radkovets N. (2016). Lower Devonian lithofacies and palaeoenvironments in the southwestern margin of the East European Platform (Ukraine, Moldova and Romania). *Estonian Journal of Earth Sciences*, 65(4), 200–2013. <https://doi.org/10.3176/earth.2016.18>.
- Radkovets N., Kotarba M. & Wójcik K. (2017b). Source rock geochemistry, petrography of reservoir horizons and origin of natural gas in the Devonian of the Lublin and Lviv basins (SE Poland and western Ukraine). *Geological Quarterly*, 61 (3), 569–589. DOI: <https://doi.org/10.7306/gq.1361>.
- Radkovets N., Rauball J. & Iaremchuk I. (2017a). Silurian black shales of the Western Ukraine: petrography and mineralogy. *Estonian Journal of Earth Sciences*, 66 (3), 161–173. DOI: <https://doi.org/10.3176/earth.2017.14>.

- Royer D. L. (2002) CO₂-forced climate thresholds during the Phanerozoic. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 70, 5665–5675. <https://doi.org/10.1016/j.gca.2005.11.031>.
- Sachsenhofer R. F. & Koltun Y. V. (2012). Black shales in Ukraine. A review. *Marine and Petroleum Geology*, 30, 1–12. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.marpetgeo.2011.08.016>.
- Sonnenberg S. A. & Pramudito A. (2009). Petroleum geology of the giant Elm Coulee field. Williston Basin. *AAPG Bulletin*, 93(9), 1127–1153. <https://doi.org/10.1306/052809090006>.
- Torsvik T. H., Smethurst M. A., Meert J. G., Van der Voo R., McKerrow, W. S., Brasier M. D., Strut B. A. & Walderhaug H. J. (1996). Continental break-up and collision in the Neoproterozoic and Palaeozoic: a tale of Baltica and Laurentia. *Earth Science Reviews*, 40, 229–258. DOI: [https://doi.org/10.1016/0012-8252\(96\)00008-6](https://doi.org/10.1016/0012-8252(96)00008-6).
- Verniers J., Maletz J., Kříž J., Žigait Ž., Paris F., Schönlaub H. P. & Wrona R. (2008) Silurian: In: T. McCann (Ed.). *The Geology of Central Europe* (Vol. 1. Pp. 249–302). London, Geological Society. URL: https://www.researchgate.net/profile/Florentin-Paris/publication/281186617_Silurian_of_Central_Europe/links/5602c93a08ae3b544e360576/Silurian-of-Central-Europe.pdf.

Natalia RADKOVETS¹, Yuriy KOLTUN²

^{1,2} Institute of Geology and Geochemistry of Combustible Minerals, NAS of Ukraine, 3a, Naukova Str., Lviv, 79060, Ukraine, tel. +38(032)264-97-99, e-mail: radkov_n@ukr.net, ¹ <https://orcid.org/0000-0002-1770-6996>, ² <https://orcid.org/0000-0001-9884-5957>.

DYNAMICS OF SEDIMENTATION WITHIN THE SOUTHWESTERN SLOPE OF THE EAST EUROPEAN PLATFORM IN THE SILURIAN-EARLY DEVONIAN

Purpose. The objective of this study is the investigation of the Silurian-Lower Devonian (Lochkovian) carbonate-clay sedimentary complex of the southwestern slope of the East-European platform, the formation of which was the result of a single cycle of geodynamic and sedimentary events in the lithological record of the southern continental margin of Baltica. **Methodology.** The study is based on well-logs correlation, lithological and geochemical investigations of core samples, and petrographic thin sections analysis. The obtained results were used to establish patterns of changes in the material composition of the studied strata in time and space in order to determine the dynamics of the basin development of the continental margin of the southwestern slope of the Eastern European platform in the Silurian-Early Devonian. **Results.** It is established that the formation of the carbonate-clay sequence represents a single sedimentary cycle and was the result of a complex of geodynamic, depositional and paleoclimatic events that took place on the southern continental margin of Baltica. The Silurian period was characterized by intensive development of benthic organisms and the formation of reef structures in the proximal part of the basin and clay-carbonate muds enriched with dispersed organic matter in its distal part. In the Early Devonian, carbonate biogenic sedimentation continued throughout the basin. The maximum content of carbonates (80–98 %) fixes the existence of the reef constructions in the sedimentary record of the basin. Lower values of carbonate content are characteristic of marls (40–55%) and biotrititic limestones (56–75 %), which make the main part of the Silurian sequence. There are no reef constructions in the section of the Lochkovian stage of Devonian, and the content of calcium carbonate in the rocks varies from 45 to 83 %. The content of CaCO₃ in mudstones and calcareous mudstones of the Silurian varies from 5 to 15 %. **Originality.** The applied complex of lithological, geochemical, geological-geophysical and paleogeographic investigations allowed studying the dynamics of the sedimentary basin in the Silurian-Early Devonian with the assessment of the possibility of participation of these strata in the generation of oil and gas hydrocarbons. **Practical significance.** The obtained results show that the carbonate-clay complex of sedimentary rocks of the Silurian and Lower Devonian (Lochkovian) of the studied region can be considered as a separate petroleum system, including source rocks, reservoir rocks and possible conventional and unconventional oil and gas accumulations.

Key words: Ukraine, Silurian, Devonian, shelf of Baltica, carbonate-clay sequence, organic-rich rocks, oil and gas generation.

Надійшла 10.03.2022 р.