

*Віталій ПРИВАЛОВ, Рейнгард ЗАКСЕНГОФЕР, Корнелія ШПІГЕЛЬ,  
Олена ПАНОВА, Микола ЖИКАЛЯК*

## **РОЗВИТОК ПРОЦЕСІВ ВУГЛЕФІКАЦІЇ У ДОНБАСІ ЯК ПОСЛІДОВНІСТЬ ТЕКТОНІЧНИХ І ТЕРМАЛЬНИХ ПОДІЙ**

*На підставі використання методів чисельного моделювання давніх теплових потоків за даними зміни з глибиною відбивної властивості вітриніту і фішін-трекового аналізу розроблено модель послідовності тектонічних і термальних подій у Донбасі, які привели до процесів вуглефікації. Тепловий потік під час максимального занурення (сакмарський час) змінювався у межах від 40 мВт/м<sup>2</sup> до 75 мВт/м<sup>2</sup>. У межах району досліджень намічаються два „епіцентри“ аномально високих теплових потоків після часів максимального занурення на рівні 175...200 мВт/м<sup>2</sup>, що корелюються з андезитовим-трахіандезитовим магматизмом під час пфальцьської фази герцинського тектонічного циклу (межа пермі і тріасу — середній тріас). В області розвитку пул-апаратів у середній юрі — ранній крейді проявився другий термальний епізод як відгук на режим регіональної реорганізації полів напружень і внутріплитного розтягання. Методами апатит фішін-трекового аналізу оцінено температури, яких зазнали верстви під час термальних подій. Зокрема, у Чистяково-Сніжнянському районі формаційна температура в середині світи L(C<sub>2</sub><sup>6</sup>) становила на момент першого „термального епізоду“ — 110...120°C, другого "термального епізоду" ~90 °C. У новій моделі для структур еродованої Донецької складчастої споруди передбачено два інверсійні епізоди та зроблено оцінки амплітуд інверсії. Перший — внутріпермський інверсійний епізод спричинив основну денудацію відкладів карбону. Другий інверсійний епізод відбувся у післясередньотріасовий час. Результати досліджень показують, що метан у вугленосній товщі Донбасу генерувався не тільки під час максимального доінверсійного занурення, а й на пізніших етапах, що дає змогу по-новому глянути на питання його збереженості та потенційні можливості виявлення родовищ вуглеводнів у регіоні досліджень.*

Донецький басейн традиційно перебував у полі пильної уваги багатьох поколінь геологів як центр максимального вугленагромадження у карбоні, що просторово сполучений з однією з найбільших в Європі ртутно-сурм'яних провінцій. Наразі переважає наукова думка про приналежність Донбасу до протяжної палеорифтогенної зони [1, 2, 3].

У сучасному структурному плані велика частина басейну є еродованою Донецькою складчастою спорудою (ДСС), де на рівень ерозійного зрізу виходять зім'яті у складки З-ПнЗ (С-ПдС) простягання і порушені підкидами, насувами зі зсувовим компонентом зміщення [4] пізньопалеозойські, переважно кам'янову-

гільні відклади. За межами відкритого Донбасу, на його окраїнах, складки ДСС занурюються під малопотужний чохол менш дислокованих мезо-кайнозойських відкладів. На еродовані структури ДСС у межах пенеplenізованого палеозойського масиву, розчленованого густою гідрографічною мережею, орографічно накладається Донецька височина, яка є найбільш піднесеним місцем Лівобережної України. Протягом усієї пізньопалеозойської і мезозойської історії розвитку Донецький басейн розвивався у режимі мобільної структури, чия аномальна поведінка знайшла відображення у специфічних умовах седиментогенезу, характері розподілу потужностей осадових формацій, морфології та інтенсивності тектонічних дислокацій, характеристиках гравітаційного, магнітного і сучасного геотермічного полів [3, 5].

Питання про причини і механізми процесів вуглефікації у Донбасі неодноразово розглянуто в геологічній літературі [5—7]. Вони, як і раніше, є актуальними для вирішення прикладних задач, пов'язаних із визначенням якісних характеристик вугілля і викидонебезпечности, для вивчення історії геологічного розвитку цього найбільшого вугільного басейну. У цій праці ми використовували методи чисельного моделювання древніх теплових потоків [8, 9] і аналізу треківих даних для реконструкції факторів, що контролювали динаміку процесів вуглефікації у Донбасі. Крім того, визначення параметрів палеогеотермічних умов становить інтерес для з'ясування багатьох аспектів геологічної еволюції басейну і суміжних територій, урахуваючи розрахункові оцінки потужностей еродованих відкладень і часових інтервалів генерації метанових покладів, а також сприяє кращому розумінню процесів формування гідротермально-метасоматичних змін гірських порід і рудної мінералізації.

Площинне поширення зон різного ступеня вуглефікації і відповідних їм областей постдіягенетичних змін осадової товщі в Донбасі є результатом послідовного накладення багатьох подій [8]. Серед них — 1) регіональний метаморфізм вугленосних відкладень у зв'язку з їхнім зануренням у доінверсійний період; 2) диференційоване піднімання (інверсія) території басейну, формування складок і ерозійні процеси, завдяки яким вугленосні відклади, що колись залягали на глибоких горизонтах, виявилися на денній поверхні; 3) син- чи постінверсійна „термальна подія“, що проявилася вибірково і викликала прояв додаткового метаморфізму, 4) зміщення площин ізометаморфізму, переважно зсувовного характеру, у зонах розривних порушень. Зокрема, у Центральному районі Донбасу в районі Головної антикліналі поверхні ізометаморфізму залягають більш полого порівняно з гірськими породами на крилах складки [5, 8, 9]. Практично це означає, що в ядрі антикліналі ступінь метаморфізму є нижча, ніж на її крилах, і це є типовим для найбільш занурених частин сусідніх Південної та Північної синкліналей. Отже, йдеться про нову син- чи постінверсійну „термальну подію“ і пов'язані з нею підвищені теплові потоки, що викликали прояви додаткового метаморфізму. На завершальному етапі по розривних порушеннях відбулися зміщення зі значним зсувним компонентом зміщення, що роз'єднали і змістили поверхні ізометаморфізму. Отже, часові межі події (у вигляді одного або серії теплових імпульсів) теоретично можуть бути окреслені у проміжку між уральською фазою герцинського тектонічного циклу (границя ранньої-пізньої пермі) і, дуже ймовірно, ларамійською фазою альпійського тектонічного циклу (межа крейди — палеогену) [5, 6, 8].

Як відомо [2,10,11], у межах цього часового інтервалу в Донбасі відбулося три етапи магматичної активності, з якими можна пов'язувати ефект „термальної події“. На границі ранньої та пізньої пермі після висхідних рухів території досліджень [5] у межах секторів локального розтягу [12, 13] напередодні або синхронно зі складчастістю [11] відбувається впровадження інтрузивних тіл Південно-Донбаського інтрузивного комплексу [11, 14]. Лужна базальтова магма цього комплексу генерувалася, диференціювалася і контамінувалася короною речовиною в умовах стиснення у проміжному вогнищі [8], звідки ін'єкційно впорскувалася на верхні горизонти в контур доволі невеликих за площею секторів локального розтягу. Процеси впровадження і застигання магми були, ймовірно, короточасні й не супроводжувалися збільшенням регіональних теплових потоків, про що свідчить чітко локальні, однак високоградієнтні ореоли контактового (магмотермічного) метаморфізму вугілля у Південно-Донбаському районі [14].

На границі пермі і тріасу (пфальцьська фаза герцинського тектонічного циклу) у Донбасі відбувається перебудова тектонічного режиму. У ПнПнС — ПдПдЗ напрямі (поперечно простяганню основних донецьких складок) вектор стиснення змінюється розтяганням [12], виникають умови для правозсувної активізації головної дислокаційної зони (ГДЗ) у межах центрального комплексу глибинних розривів [13] з перегрупуванням секторів локального розтягу. Вздовж ГДЗ на рівні кристалічного фундаменту починають „відкриватися вікна“ у межах різномасштабних, однак загалом великих за площею басейнів призсувного розтягу (пул-апаратів) [12, 13]. Тут зростають теплові потоки, а на ще глибших горизонтах в обстановці локалізованого розтягу виникають вогнища часткового плавлення речовини континентальної літосфери, магматичні деривати яких у вигляді вивержених покривів і субвулканічних пошарових покладів андезит-трахіандезитового комплексу досягають приповерхневих горизонтів. Невисокий зміст Mg у вивержених породах цього комплексу (1,22 ... 5,0% [10]), ймовірно, свідчить про загалом знижені ступені часткового плавлення речовини або тисках глибинних магм відповідно до критеріїв, викладених у роботах [15, 16]. Ці обставини утруднювали диференційоване відносно швидкостей просування магм до денної поверхні, однак могли сприяти формуванню великих прихованих у палеозойських відкладах інтрузій. З часом застигання і втрати пластичності магматичні маси припинили висхідні рухи, але продовжували впливати на вміщуючі породи підвищеними тепловими потоками. Зокрема, над виділеними мінімумами магнітного поля, що відображають об'єми гідротермально-метасоматичного пророблення на ділянках поширення такого роду інтрузій, в Амвросієвському і Чистяково-Сніжнянському районах задокументовані великі області березитизації й аргілітізації [17].

На границі середньої і пізньої юр внаслідок трансрегіональної реорганізації полів напружень, що виникли як відгук на процеси рифтової пульсації у Північній Атлантиці й Арктиці та відокремлення корових блоків у рифтовій системі Тетісу [18, 12], у Донбасі знову виникають тектонічні умови, подібні з тими, котрі існували під час пфальцьської фази [11]. Тектонічний епізод внутріплитного розтягання, з яким варто пов'язувати формування дайок Міуського комплексу лампрофірів, проявився у Донбасі в межах структур призсувного розтягу (пул-апаратів PA4 і PA5) у межах осової частини басейну.

Судячи з концентрації Mg у витриманих по простяганню (15—30°) дайках (9,77...14,0% [10]), високопластична магма Міуського комплексу під великим тиском упорскувалася у попередньо виниклі тріщини відриву з відносно швидким розвантаженням гідротерм і стабілізацією локальних теплових потоків у межах пучка виниклих дайок. Про такий хід подій термальної історії свідчать: а) чіткі, з розвитком характерної окалини, контакти дайок з вміщаючими відкладами; б) повна відсутність інтрузивних апаратів центрального типу; в) приуроченість контрастних і найбільш протяжних первинних ореолів аномалій ртуті до дайок та зон тріщинуватости, що їх вміщують; г) відносно слабкі ознаки гідротермальної діяльності у формі вбогої мережі прожилків кальциту і гірського кришталю, малопотужних зон аргілізації і тонкодисперсної висипки сульфідів по тріщинах.

Отже, реальнішим часовим проміжком, що відповідає „термальній події“ чи, принаймні, його значнішому по величині тепловому імпульсу, міг бути інтервал прояву пфальцької тектонічної фази (границя пермі й тріасу). На багатьох ділянках можливе локальне підвищення теплових потоків під час епізоду внутріплитного розтягання, з яким варто пов'язувати формування дайок Міуського комплексу лампрофірів.

В іпостасі вихідних даних для моделювання використані результати вимірів найчутливішого до зміни ступеня метаморфізму параметра — відбивної властивості вітриніту ( $R_o$ , %). Виміри виконувалися в аншліфах, виготовлених із проб вугілля, відібраних з керну 23 свердловин у Червоноармійському, Донецько-Майківському і Чистяково-Сніжнянському районах Донбасу (рис. 1). Критеріями добору свердловин для моделювання були: а) довжина інтервалу випробування (понад 750 м); б) значення відбивної властивості вітриніту нижче 6,0%. Дані вимірів представлялися графічно в координатному полі:  $R_o$  (відбивна властивість) — вісь абсцис;  $H$  (глибина добору проби) — вісь ординат. Додатково при моделюванні використовувалася така інформація: дані про потужність і літологічний склад свит по кожній свердловині, а також фізичні параметри (наприклад, константи теплопровідності і теплоємності для різних літологічних типів порід), дані вимірів температур гірських порід по свердловинах і розрахункові значення сучасних теплових потоків на різних гіпсометричних рівнях. Процедура чисельного моделювання складалася у підборі до емпіричного розподілу точок у координатному полі  $\{R_o; H\}$  найкращого математичного наближення у вигляді лінії, геометрія якої залежить від сполучення різних значень теплових потоків і потужности еродованих відкладень. Додаткове калібрування розрахункової кривої  $R_o(H)$  виконувалися з урахуванням даних щодо змін сучасних температур гірських порід ( $T$ , °C) по розрізі свердловини. У процесі моделювання розрахункової кривої  $R_o(H)$  використано стандартний кінетичний алгоритм EASY % $R_o$  [19], а при значеннях  $R_o$  більше 4,69 — його розширену версію [20]. Дані про потужність стратиграфічних підрозділів та їхньої літології використано для реконструкції кривих опускання по свердловинах з урахуванням алгоритму декомпації відкладень. Для побудови чисельних моделей зміни температур гірських порід для різних стратиграфічних інтервалів з часом використовувалося програмне забезпечення PDI-1D<sup>TM</sup> і PetroMod 6.0 (IES, Jülich). Результати моделювання (криві опускання та історія теплових потоків) уточнювалися з урахуванням вихідних даних  $R_o$  і  $T$ .

Результати проведених досліджень на підставі використання методів числового моделювання давніх теплових потоків за даними зміни з глибиною відбивної властивості вітриніту вказують, що тепловий потік під час максимального занурення (сакмарський час) змінювався у межах від 40 мВт/м<sup>2</sup> до 75 мВт/м<sup>2</sup> (рис. 1). Різке зростання теплового потоку в східному напрямі спостерігалось приблизно по лінії Донецько-Кадіївського поперечного глибинного розриву.

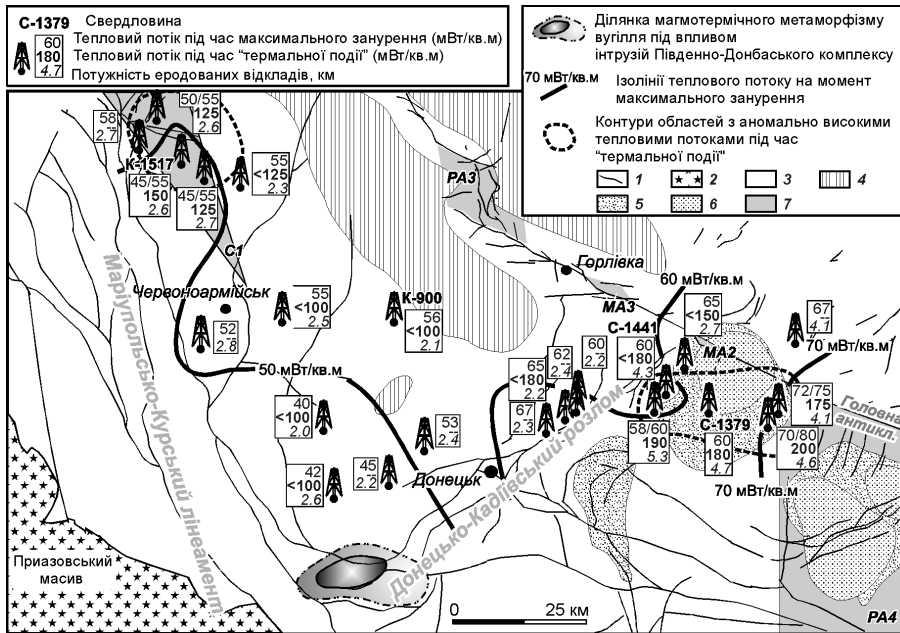


Рис. 1. Результати моделювання теплових потоків на території Донецького басейну: 1 — розривні порушення; 2 — докембрій; 3 — карбон; 4 — область поширення пермських відкладів; 5 — негативні аномалії магнітного поля, що приблизно відповідають за даними наукової розвідки [17] областям гідротермально-метасоматичного пророблення на ділянках глибинних інтрузивних тіл; 6 — контури передбачуваних схованих інтрузивних тіл; 7 — контур секторів локального розтягу за даними праць [12,13].

У межах району досліджень вимальовуються два „епіцентри“ аномально високих теплових потоків після часів максимального занурення на рівні 175 ... 200 мВт/м<sup>2</sup>. Вони корелюються з андезитовим-трахіандезитовим магматизмом під час пфальцької фази герцинського тектонічного циклу (границя пермі і триасу — середній триас). Так, у Чистяково-Сніжнянському районі область поширення аномально високого теплового потоку під час „термальної події“ (на рівні 175...200 мВт/м<sup>2</sup>) просторово тяжіє до виявленого пул-апарту МА2 (Михайлівська ділянка) і, очевидно, поширюється в область найбільшого за площею пул-апарту РА4 [12, 13]. Саме в межах цих ділянок за даними геофізичних зйомок передбачається існування інтрузивних тіл андезит-трахіандезитового комплексу [17]. Друга ділянка, де зафіксовані підвищені

теплові потоки під час „термальної події“ (у діапазоні 125...150 мВт/м<sup>2</sup>), лежить на північ від м. Червоноармійська і просторово збігається з положенням передбаченого в роботі [12] сектора локального розтягу C1 (рис. 1) на перетині Маріупольсько-Курського лінеаменту, зони розривів Волноваха-Лозова і поперечного глибинного розриву. Дуже ймовірно, що ефект локального збільшення теплових потоків у межах цього сектора може бути пов'язаний з результатом впливу прихованого інтрузивного тіла [8, 9].

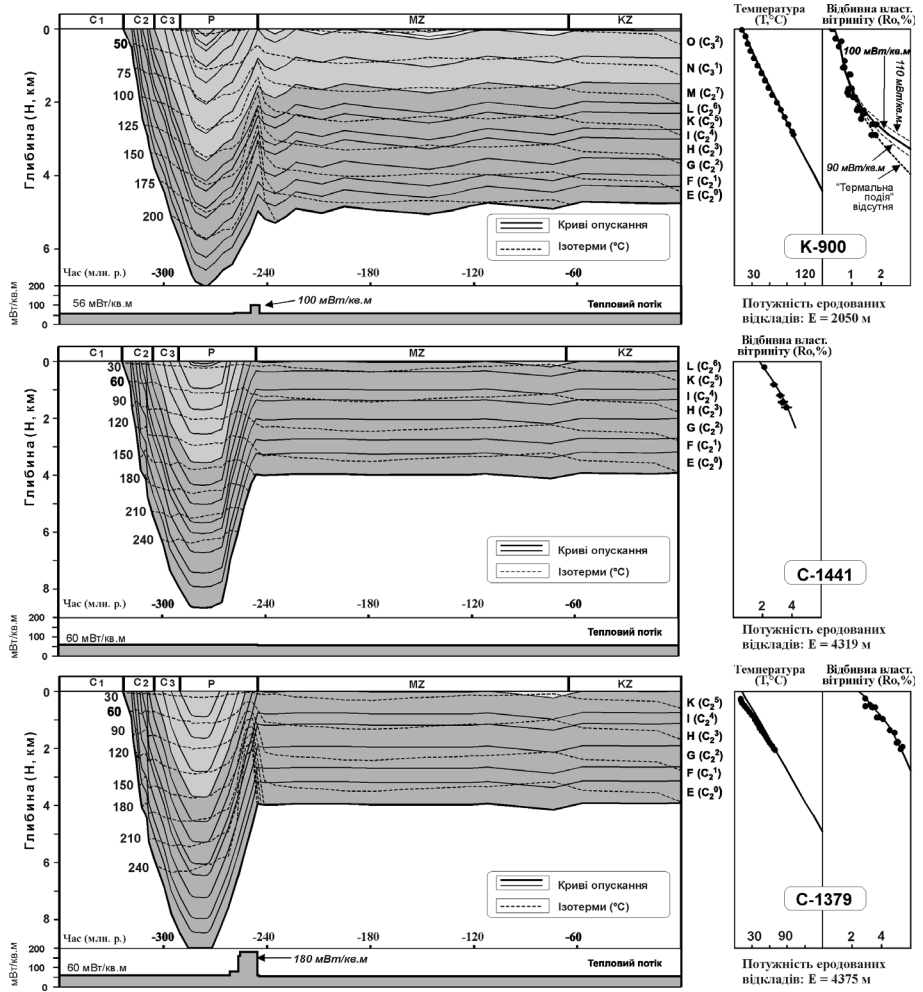


Рис. 2. Криві опускання й історія еволюції теплових потоків для свердловин K-900, C-1441, C-1379.

Як ілюстрацію результатів моделювання і деяких обмежень, що часто-густо виникають, на однозначність рішення розглянемо кілька свердловин (рис. 2). Для

свердловини К-900 тепловий потік  $56 \text{ мВт/м}^2$  і оцінка величини ерозійного зрізу в 2050 м дає найкраще наближення кривої  $Ro(H)$  до емпіричних даних  $Ro$ . Позаяк відбивна властивість вітриніту контролюється переважно максимальними температурами, отримане значення теплового потоку строго дійсне тільки для інтервалу опускання відкладів карбону на найглибші за всю історію розвитку структури горизонти. Цей термотектонічний епізод відповідає сакмарському (ранньопермському) часу, оскільки вже на границі ранньої — пізньої пермі басейн зазнав інверсії геотектонічного режиму [5, 6, 12]. Теплові потоки в мезозойський час не можуть бути визначені точно, принаймні з використанням лише аналізу зміни відбивної властивості вітриніту з глибиною. Проте існує можливість визначити верхнє граничне значення потоку, що корелюється з моментом „термальної події“. Зокрема, розподіл точок  $Ro$  для свердловини К-900 добре погоджується з модельними значеннями теплових потоків на границі пермі й тріасу 100, 90 ...  $\text{мВт/м}^2$  або навіть повною відсутністю „термальної події“, однак модель теплового потоку  $110 \text{ мВт/м}^2$  дає цілком неприйнятний результат.

Для свердловини С-1441 розподіл точок  $Ro$  досить добре описується тепловим потоком на момент максимального занурення  $60 \text{ мВт/м}^2$  і потужністю еродованих відкладів більш як 4,3 км. У пробуреній на схід свердловині С-1379 приблизно при порівнянних зі свердловиною С-1441 значеннях теплового потоку на стадії максимального занурення і потужності еродованих відкладень при підборі кривої  $Ro(H)$  варто допустити існування аномального-високого постінверсійного теплового потоку ( $180 \text{ мВт/м}^2$ ). На рис. 2 показаний варіант вікового трактування „термальної події“, розглянутий раніше.

Отже, невизначеність деталізації хронології термальних подій, що виникає при ухваленні остаточного рішення, може бути усунута із застосуванням інших методів досліджень (скажімо, фішн-трекового (ФТ) датування).

ФТ датування зерен окремих мінералів (зокрема апатиту), екстрагованих із теригенних осадових порід, є новітнім методом термохронологічних досліджень, що дає змогу не тільки відновити критичні палеотемпературні події, а й простежити динаміку зміни палеотемператур з часом.

Для досліджень методом ФТ аналізу [21] були використані кристали апатиту, отримані з 20 проб пісковиків, відібраних у гірничих виробках шахт, свердловинах та відслоненнях району досліджень.

Протягом геологічної історії у зернах апатиту відбуваються реакції спонтанного ядерного ділення ізотопу урану  $^{238}\text{U}$ , унаслідок якої формуються частки іонізуючого випромінювання. Володіючи високою енергією, частки-осколки ядер викликають ушкодження кристалічних ґраток мінералу, що і називають фішн-треками або „слідами ділення“. Нагромадження треків у мінералі з часом — процес, аналогічний нагромадженню ізотопів у реакціях радіоактивного розпаду, однак фактор температурного режиму вносить значні корективи в параметри щільності „слідів розпаду“ і розподіл їхніх довжин. Власне кажучи, апатит є природним геотермометром, чутливим до температурного діапазону  $110—60^\circ\text{C}$ .

Термальне опромінення зразків нейтронами виконано в каналах реактора NIFAR у Лукас Гейтс (Австралія). Виміри щільності треків та їхніх горизонтальних довжин виконано з використанням оптичного мікроскопа Zeiss Axiotron (збільшення  $1250\times$ , сухий об'єктив) і дигітайзеру високого ступеня вирішення.

Результати використання цього методу дали змогу ввести в іпостасі калібруючих даних — формаційні температури для багатьох термотектонічних подій (максимального занурення, імпульсів магматизму) та уточнити результати моделювання щодо окремих свердловин. Зокрема, на рис. 3 показані результати введення калібруючих даних з подальшою модифікацією кривих опускання та історії еволюції теплових потоків для свердловин К-1517 і С-1379.

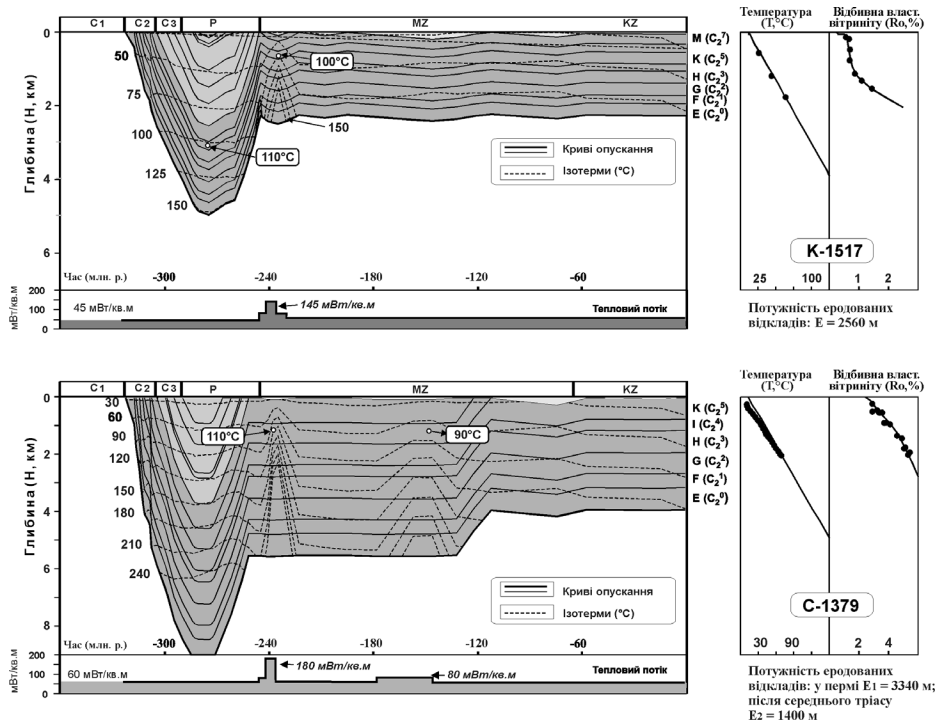


Рис. 3. Криві опускання й історія еволюції теплових потоків для свердловин К-1517, С-1379 з урахуванням калібрувальних температур за апатит фішн-трековим аналізом.

Для свердловини К-1517 „термальна подія“, спочатку оцінена у вигляді теплового імпульсу на границі пермі і тріасу на рівні  $150 \text{ мВт/м}^2$ , трохи змістилася у часовий інтервал середнього тріасу (235—241 млн. років) з оцінкою теплового потоку  $145 \text{ мВт/м}^2$  (рис. 3).

Для свердловини С-1379 використання результатів ФТ методу показало реалістичність сценарію, при якому модель одноактної „термальної події“ (рис. 2) була замінена на модель із двома „термальними епізодами“. Для першого „термального епізоду“ (пізня перм — середній тріас, тепловий потік  $180 \text{ мВт/м}^2$ ) як калібровану температуру для інтервалу гірських порід у середині свити L ( $C_2^6$ ) вводилася величина 110—120 °С. Для другого „термального епізоду“ ФТ метод дає можливість досить точно визначити каліброчну формаційну температуру на рівні ~90 °С, однак не дає змоги гранично точно деталізувати вік, чії найімовірніші



оцінки укладаються у досить протяжний інтервал середня юра — рання крейда. Області прояву другого термального епізоду просторово тяжіють до районів розвитку пул-апаратів *MA2* і *PA4*, що під час регіональної реорганізації полів напружень у середньо-пізньоюрські часи функціонували як домени призсувого розтягу.

Результати нового моделювання для свердловини С-1379 з обчисленням ФТ даних дало можливість внести уточнення у криві опускання та часові оцінки амплітуд інверсійного підняття. Зокрема, у новій моделі (рис. 3) передбачені два інверсійні епізоди. Перший — основний, внутріпермський інверсійний епізод спричинив ерозію 3,3 км відкладів карбону. Другий інверсійний епізод, що відбувся у післясередньотріасовий час (імовірно, під час австрійської фази тектогенезу в ранній крейді [22,12]) призвів до денудації 1,4 км відкладів.

Унаслідок досліджень удалося також оцінити розподіл потужності еродованих унаслідок інверсійних процесів відкладів (рис. 1). Характерною рисою цього розподілу є наявність екстремумів потужності еродованих палеозойських відкладень у центральній частині басейну, де виділяється внутріпермський епізод основної інверсії та епізод вторинної інверсії у післясередньотріасовий час.

### Висновки

1. Тепловий потік під час максимального занурення (сакмарський час) змінювався у межах від 40 мВт/м<sup>2</sup> до 75 мВт/м<sup>2</sup> (рис. 1). Різке зростання теплового потоку в східному напрямі спостерігалось приблизно по лінії Донецько-Кадіївського поперечного розриву.

2. У межах району досліджень вимальовуються два „епіцентри“ аномально високих теплових потоків, що корелюються із пфальцьською фазою герцинського тектонічного циклу (границя пермі і тріасу — середній тріас). Так, у Чистяково-Сніжнянському районі область поширення аномально високого теплового потоку під час „термальної події“ (на рівні 175...200 мВт/м<sup>2</sup>) просторово тяжіє до виявленого пул-апарату *MA2* (Михайлівська ділянка) і, очевидно, поширюється в область найбільшого за площею пул-апарату *PA4* [12,13]. Саме в межах цих ділянок за даними геофізичних зйомок передбачено існування інтрузивних тіл андезит-трахіандезитового комплексу. Друга ділянка, де зафіксовані підвищені теплові потоки під час „термальної події“ (у діапазоні 125...150 мВт/м<sup>2</sup>), лежить на північ від м. Червоноармійська і просторово збігається з положенням передбаченого в дослідженні [12] сектора локального розтягу *С1* (рис. 1) на перетині Маріупольсько-Курського лінеamentу, зони розривів Волноваха-Лозова і поперечного глибинного розриву. Дуже ймовірно, що ефект локального збільшення теплових потоків у межах цього сектора може бути пов'язаний з результатом впливу прихованого інтрузивного тіла.

3. В області розвитку пул-апаратів *MA2* і *PA4* у середній юрі — ранній крейді проявився другий термальний епізод як відгук на режим регіональної реорганізації полів напружень і внутрішлитного розтягання.

4. Результати досліджень показують, що метан у вугленосній товщі Донбасу генерувався не тільки під час максимального доінверсійного занурення, а й на

пізніших етапах, що дає можливість по-новому глянути на питання його збереженості та потенційні можливості виявлення великих родовищ вуглеводнів.

#### ЛІТЕРАТУРА

1. Чекунов А. В. К геодинамике Днепровско-Донецкой рифт-синеклизы // Геоф. журн. — 1994. — № 3. — С. 3—17.
2. Панов Б. С. Глубинные разломы и минерагения линеамента Карпинского с позиций синергетического анализа. — Киев: Препринт ИГМР АН Украины, 1994. — 74 с.
3. Кутас Р. И., Пашкевич И. К. Геотермическая и магнитная модели земной коры Донбасса (тектонический анализ совместно с данными ГСЗ) // Геоф. журн. — 2000. — № 4. — С. 21—36.
4. Привалов В. А. Закономерности распространения и эволюции тектонической нарушенности в Донецко-Макеевском районе Донбасса // Изв. высш. уч. зав. Геология и разведка, 1990. — № 3. — С. 46—55.
5. Геология месторождений угля и горючих сланцев СССР. — М.: Госгеолтехиздат, 1963. — Т. 1. — 1201 с.
6. Нагорный Ю. Н., Нагорный В. Н. Особенности геологического развития Донецкого бассейна // Геотектоника. — 1976. — № 1. — С. 74—86.
7. Левенштейн М. Л., Спирина О. И., Носова К. Б., Дедов В. С. Карта метаморфизма углей Донецкого бассейна. — М.: Мингео СССР, 1991. — 10 л.
8. Привалов В. А., Саксенхофер Р., Жикаляк Н. В., Писковой М. А., Панова Е. А. Тепловые потоки в геологической истории Донбасса: результаты моделирования // Наук. праці ДОНТУ: Серія гірн.-геолог., 2001. — Вип. 32. — С. 14—21.
9. Sachsenhofer R. F., Privalov V. A., Zhykalyak M. V., Bueker C., Panova E., Rainer T., Shymanovskyy V. A., Stephenson R. The Donets Basin (Ukraine/Russia): Coalification and thermal history. Int. J. Coal. Geol., 2002. — № 49, 33—55.
10. Лазаренко Е. К., Панов Б. С., Груба В. И. Минералогия Донецкого бассейна. — К.: Наук. думка, 1975. — Ч. 1. — 254 с.
11. Гордиенко В. В., Усенко О. В. Геосинклиальный процесс на примере герцинской геосинклинали Донбасса // Геоф. журн. — 2000. — № 5. — С. 33—38.
12. Привалов В. А. Вращение блоков и сценарий тектонической эволюции Донецкого бассейна // Геология і геохімія горючих копалин, 1998. — № 4. — С. 142—158.
13. Привалов В. А., Панова Е. А., Азаров Н. Я. Тектонические фазы в Донецком бассейне: пространственно-временная локализация и характер проявления // Геология і геохімія горючих копалин, 1998. — № 4. — С. 11—18.
14. Жерновая Г. Г. Магматермический метаморфизм углей Южного Донбасса. — К.: Препринт ИГН АН Украины, 1989. — 46 с.
15. Jaques A. L., Green D. H. Anhydrous melting of peridotite at 0—15 kb pressure and the genesis of tholeiitic basalts // Contrib. Mineral. Petrol. — 1980. — V 73. — P. 287—310.
16. Falloon T. J., Green D. H., Hatton C. J., Harris K. L. Anhydrous partial melting of a fertile and depleted peridotite from 2 to 30 kb and application to basalt petrogenesis // J. Petrol. — 1988. — V 29. — P. 1257—1282.

17. Глубинное строение, эволюция флюидно-магматических систем и перспективы эндогенной золотоносности юго-восточной части Украинского Донбасса / Под ред. В. А. Шумлянского. — К.: Изд. ИФИ Укр. науч. асоц., 1996. — 74 с.

18. *Ziegler P. A.* Evolution of the Arctic-North Atlantic and the Western Tethys // Amer. Assoc. Petrol. Geol. Mem. — 1988. — V 43. — 198 p.

19. *Sweeney J. J., Burnham A. K.* Evaluation of a simple model of vitrinite reflectance based on chemical kinetics // Amer. Assoc. Petrol. Geol. Bulletin — 1990. — V 73. — P. 1559—1570.

20. *Everlien G.* High-temperature programmed pyrolysis of Paleozoic source rocks from Northern Germany and adjacent areas and its thermodynamic constraints // Org. Geochem. — 1996. — V 24. — P. 985—998.

21. *Gleadow A. J. W., Duddy I. R., Green P. F., Lovering J. F.* Confined fission track lengths in apatite: A diagnostic tool for thermal history analysis // Contrib. Mineral. Petrol. — 1986. — V 94. — P. 405—415.

22. *Белоконь В. Г.* Глубинное строение Донбасса // Геол. журн. — 1975. — № 5. — С. 11—25.

#### SUMMARY

**Vitaliy PRIVALOV, Reinhard SACHSENHOFER, Cornelia SPIEGEL, Olena PANOVA,  
Mykola ZHYKALYAK**

#### COALIFICATION PROCESSES IN THE DONBAS AS A CONSEQUENCE OF TECTONIC AND THERMAL EVENTS

Heat flow numerical models based on vitrinite reflectance data with use of apatite fission track data for calibration were applied to elucidate the factors that control coalification and to trace consequence of tectonic and thermal events in the Donets Basin). Heat flow during maximum burial in Permian (Sakmarian) times was in the range of 40 to 75 mW/m<sup>2</sup>. Within the limits of the study area two centres of extremely high post-maximum burial heat flows varying in the range of 175 to 200 mW/m<sup>2</sup> have been revealed. These are correlated with andesytic magmatism during the Pfalzian stage of the Hercynian tectonic cycle (boundary Permian — Triassic — Middle Triassic). In region of pull-aparts during Middle Jurassic — Early Cretaceous the second thermal episode took place. This reheating was most likely related to an enhanced heat flow during Jurassic intraplate extension. The formational temperatures were estimated with the help of apatite fission track analysis. The Tchystyakovo-Snezhnyansky area experienced a Permo-Triassic thermal event with temperatures of 110...120°C, meanwhile for Jurassic to Cretaceous reheating (second thermal episode) the maximal temperature was ~90°C. New model incorporates the presence of two inversion episodes for the Donets Fold Belt. Intra-Permian inversion episode removed the most of Carboniferous rocks, meanwhile the second one took place after Middle Triassic times. Our results suggest that coal bed methane was generated not only during maximum burial, but also afterwards. This allows to get new insight into methane preservation potential and to forecast good chance of success in a prospect of hydrocarbon fields within this area.