

ЗАГАЛЬНА, МОРСЬКА ГЕОЛОГІЯ ТА ПАЛЕОНТОЛОГІЯ

УДК 553.98:550.8:551.463:550.42:574.5
[https://doi.org/10.18524/2303-9914.2025.2\(47\).344774](https://doi.org/10.18524/2303-9914.2025.2(47).344774)

О. С. Дікол, доктор філософії

Одеський національний університет імені І. І. Мечникова,
кафедра морської геології, гідрогеології, інженерної геології та палеонтології
Шампанський пров., 2, м. Одеса, 65058, Україна
Olena.dikol@gmail.com;
<https://orcid.org/0000-0002-4258-103X>

ОЗНАКИ ПРОЯВЛЕННЯ ГЛИБИННИХ ВУГЛЕВОДНЕВИХ ФЛЮЇДІВ У ДОННИХ ВІДКЛАДАХ ПРАДНІПРОВСЬКОЇ ПЛОЩІ ЗА ДАНИМИ КОМПЛЕКСНИХ ДОСЛІДЖЕНЬ

Дослідження присвячене виявленню проявів глибинного флюїдного потоку у донних відкладах на площі Прадніпровська із застосуванням комплексних досліджень, а саме даних сейсміки, структурної геології, газової хроматографії, мінерало- та термобарогеохімії, хімії, ізотопії та біоіндикації. Інтерпретація сейсмічних профілів виявила зони втрати кореляції з великих глибин, інтерпретовані як труби дегазації, просторово пов'язані з тектонічними порушеннями. Дані газової хроматографії виявили метан, його гомологи, алкени й алкіни. Мінералогічні та термобарогеохімічні дані підтвердили вплив флюїдів на структуру мінералів, а показники $\delta^{13}\text{C}$ та $\delta^{18}\text{O}$ засвідчили вплив глибинних флюїдів на ізотопне співвідношення. Хімічні аналізи підтвердили наявність елементів із глибинних шарів Землі. Біоіндикація продемонструвала чутливість форамініфер і нематод до вуглеводневих газів, зокрема, поява лагенід та кореляція окремих видів нематод з ацетиленом розглядаються як індикатори глибинних процесів. На основі отриманих результатів розроблено кількісно-генетичну модель розвантаження флюїдів, що може бути використана як критерій прогнозу вуглеводневого потенціалу.

Ключові слова: Чорне море, північно-західний шельф, глибинний флюїдний потік, абіогенний метан, труби дегазації, газогеохімія, ізотопи, біоіндикація.

ВСТУП

Походження вуглеводнів залишається до сьогоднішнього дискусійним — існують як органічна, так і неорганічна теорії, при цьому ці дві теорії не являються антагоністичними, а на думку автора лише доповнюють один одного.

Особливу увагу дослідників останніми десятиліттями привертає дегазація дна Чорного моря, яка є об'єктом численних національних і міжнародних наукових програм (Шнюков та ін., 2013). Згідно з розрахунками John D. Kessler

та співавт. (2006), щорічно з донних відкладів у товщу води надходить близько 4,95–5,65 Тг метану ($1 \text{ Тг} = 10^{12} \text{ г}$). Інші дослідження (Созанський, 2013) оцінюють загальний вміст метану у водах Чорного моря приблизно у 80 млрд. м³.

З огляду на постійне оновлення водних мас Чорного моря, зумовлене водообміном із Середземним морем та припливом прісної води від річок (Дунай, Дніпро, Дністер тощо), можна припустити, що значна частина метану формується також за рахунок глибинного флюїдного потоку (ГФП) із надр (Дікол, 2025).

На північно-західному шельфі Чорного моря виявлено понад 200 антиклінальних і купольних структур, частина з яких уже забезпечує промислові припливи природного газу. Крім того, поширеність газових сипів, факелів і грязьових вулканів свідчить про активну міграцію глибинних флюїдів, що підтверджує високий перспективний потенціал цього району.

Робочою гіпотезою дослідження було припущення, що формування покладів вуглеводнів в осадовому чохла північно-західного шельфу Чорного моря значною мірою зумовлюється висхідними ГФП абіогенного мантийного походження, які можуть залишати свої «сліди» в донних відкладах. Для її перевірки та знаходження доказів наявності цих слідів необхідно було здійснити детальний комплексний аналіз різномірної та багаторівневої геолого-геофізичної й біоіндикаційної інформації.

Мета дослідження полягає у виявленні ознак проявлення глибинного флюїдного потоку (ГФП) у донних відкладах північно-західного шельфу Чорного моря в межах Прадніпровської площі, а також у визначенні особливостей їхнього розвантаження та здійсненні генетичного тлумачення отриманих результатів.

МАТЕРІАЛ І МЕТОДИ ДОСЛІДЖЕННЯ

Розвантаження ГПФ у Чорному морі є частиною глобального процесу дегазації Землі, який впливає на геологічний і біологічний розвиток планети. Згідно з сучасними уявленнями, флюїдна міграція може відбуватись як під час, так і після осадонакопичення, що має важливе значення для розуміння механізмів формування вуглеводневих скупчень і визначення критеріїв їх пошуку. (Чепіжко та ін., 2020).

Прадніпровська площа розташована у внутрішній зоні Західно-Чорноморського шельфу на глибинах приблизно 25–35 м, у межах переходу Південно-української монокліналі до блокової структури північно-західного внутрішнього шельфу. У тектонічному плані вона належить до східної центрикліналі Криловської палеозойсько-юрської депресії, на яку насувається північно-західна центрикліналь Каркінітсько-Північнокримського прогину, що розміщується в межах найбільш зануреної південної частини Східноєвропейської платформи. З геоморфологічного погляду, ця територія є підводним продовженням великої алювіальної рівнини, де корінні породи перекриті пізньоплейстоцен-голоценовими континентальними та морськими відкладами. (Yanko et al., 2024).

Згідно з геофізичними даними геологічного підприємства «Одесморгео», встановлено, що геохімічна аномальна зона в межах Прадніпровської площі пов'язана з вертикальною міграцією ГФП, які походять із великих скупчень вуглеводнів. На основі отриманих результатів прогнозується наявність літолого-стратиграфічної пастки у відкладах юрського віку, площею близько 420 км² і потужністю до 600 м, контури якої збігаються з межами виявленої геохімічної аномалії. На площі було пробурено параметричну свердловину Прадніпровська-2 із проектною глибиною 3350 м. Під час буріння, виконаного ДАТ «Чорноморнафтогаз» у 1993 році, палеозойські відклади на вибої були помилково ідентифіковані, через що буріння зупинили на глибині 2375 м. У розрізі свердловини виділено такі стратиграфічні підрозділи: неоген (56,5–463 м), майкопські відклади (463–778 м), еоцен (778–1468 м), палеоцен (1468–1693 м), верхня крейда (1693–2121 м), нижня крейда (2121–2211 м), верхня юра (ймовірно титон) (2211–2375 м) (Коморний & Сітковська, 2007). Літологічно розріз представлений глинистими, теригенними та карбонатними породами.

Комплексні геолого-геохімічні дослідження та пробовідбір на площі проводилися у 2016–2017 роках з борту науково-дослідного судна «Искатель» (Сучков та ін., 2018). Відібрані проби герметизували та транспортували до стаціонарної лабораторії та літотеки НДЛ-3 ОНУ імені І. І. Мечникова (рис. 1).

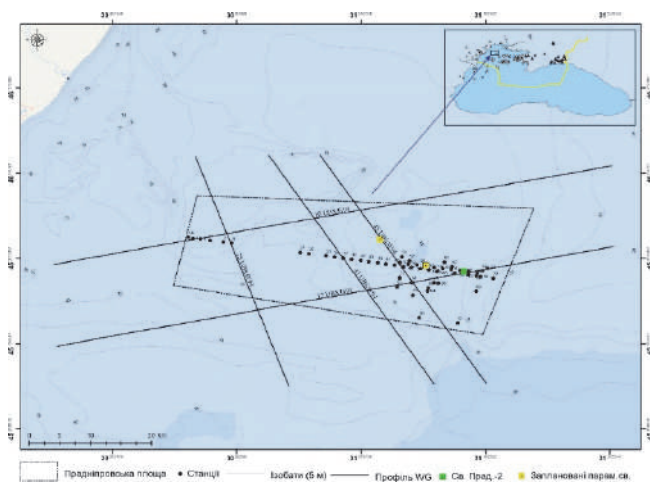


Рис. 1. Розташування станцій пробовідбору на площі Прадніпровській.

Геофізичні, геолого-структурні методи: Геолого-структурна інтерпретація геофізичних даних (зокрема фрагментів сейсмічних профілів компанії Western Geophysical — лінії № 25, 43, 45, 10, 12), наданих Інженерним центром «Укргеофізика», здійснювалася на основі аналізу інтервальних швидкостей розповсюдження сейсмічних хвиль у товщі осадових порід. При цьому було врахо-

вано інформацію параметричної свердловини «Прадніпровська-2». Значення інтервальних швидкостей (у км/с) для відповідних літологічних комплексів взято за даними Герасимова та ін. (1994), тоді як геоструктурні характеристики Прадніпровської площі наведено за Чумаком та співавт. (2007) (Дікол, 2025).

Газохроматографічні методи: Для аналізу вмісту вуглеводневих газів було відібрано 55 проб (по ≈ 300 г кожна), які герметично запаковували у скляну тару та надсилали на якісний і кількісний аналіз. Дослідження виконували з використанням газових хроматографів типу «Цвет-100» та «Цвет-500». Ідентифікацію компонентів газової суміші проводили за допомогою хроматографічної колонки, заповненої активованим оксидом алюмінію, у поєднанні з полум'яно-іонізаційним детектором.

Мінералого-рентгеноструктурний аналіз: Було досліджено 38 зразків за допомогою дифрактометра АДП-2.0 з використанням Fe K α випромінювання та Mn-фільтра. Умови проведення зйомки: струм 14 мА, напруга 34 кВ, швидкість руху лічильника – 2°/хв. Для кожного зразка додатково виконувалися спеціальні обробки: обробка 10% розчином хлороводневої кислоти та прожарювання зразка при 550 °С протягом 1 години. Після цих процедур зразки повторно аналізувалися на дифрактометрі для порівняння результатів.

Термобарогеохімічні дослідження проводилися відповідно до методик, затверджених у відділі глибинних флюїдів ІГГК НАН України під керівництвом члена-кореспондента НАН України І.М. Наумка. Для аналізу використовували наважку породи масою 200 мг фракції +1–2 мм.

Хімічний аналіз виконували методом атомно-емісійної спектроскопії з індуктивно зв'язаною плазмою на приладі Thermo Scientific iCAP 7000 Duo, оснащеному детектором типу CID або CMOS, який охоплює спектральний діапазон 167–820 нм. В межах площі було відібрано 53 зразки мушель молюска *Mytilus galloprovincialis* із донних відкладів для визначення їх хімічного складу. Для аналізу обирали мушлі фракцією 5–10 мм.

Для **ізотопного аналізу** з донних відкладів було відібрано мушлі молюска *Cardium edule* (50 зразків) та черепашки форамініфер *Ammonia tepida* (32 зразки). Після чого в лабораторії (Інститут геохімії, мінералогії та рудоутворення ім. М.П. Семененка НАН України) проби були змішані в десятикратній пропорції з PbCl₂ та були поміщені в нікелевий реактор. В ході нагрівання з суміші CaCO₃ та PbCl₂ було отримано газоподібний CO₂. Діоксид вуглецю був переведений в систему мас-спектрометра для ізотопного аналізу.

Біоіндикаційний метод. Проби досліджували у вологому стані, використовуючи бенгальську рожеву для виявлення живого мейобентосу з черепашками (форамініфери) та без них (нематоди). Відбір проводили з верхнього шару відкладів (0–2 см) за допомогою металевого кільця діаметром 10 см. Далі проби досліджували під бінокулярним мікроскопом.

РЕЗУЛЬТАТИ ДОСЛІДЖЕННЯ ТА ЇХ ОБГОВОРЕННЯ

Всі вище наведені методи використовувалися для досягнення мети та вирішення поставлених завдань. У сукупності вони забезпечують надійні докази наявності ГФП та можливої присутності скупчень (аж до родовищ) вуглеводнів у певних місцях району дослідження.

Автором було проаналізовано частину матеріалів регіональних сейсмічних досліджень, зокрема дані, отримані англійською компанією Western Geophysical. Опрацьовано результати площинної зйомки масштабу 1:200 000, які були інтерпретовані у поєднанні з геологічною та геохімічною інформацією. На основі цієї інтеграції побудовано просторову геолого-геофізичну модель. Академіки Лукін & Шестопалов (2018) обґрунтували формування дегазаційних труб наступним чином: накопичення газу триває до досягнення критичного тиску (порогу), необхідного для прориву через ущільнені породи. Після його перевищення відбувається деформація ущільнення, в результаті якої капіляри втрачають здатність утримувати газ. Це спричиняє інтенсивне вивільнення флюїду у вигляді висхідних потоків, що прориваються до поверхні дна. На основі цих тверджень на часових розрізах які вивчалися, ці висхідні потоки виглядають як області втрати кореляції сейсмічних хвиль. Виявлено зони втрати кореляції, що чітко проявляються з глибини, що віднесені автором до труб дегазації (ТД). На їх основі складено карту виходів ТД на дно (рис. 2), що підтверджує наявність вертикальних ГФП, що проривають стратиграфічні межі.

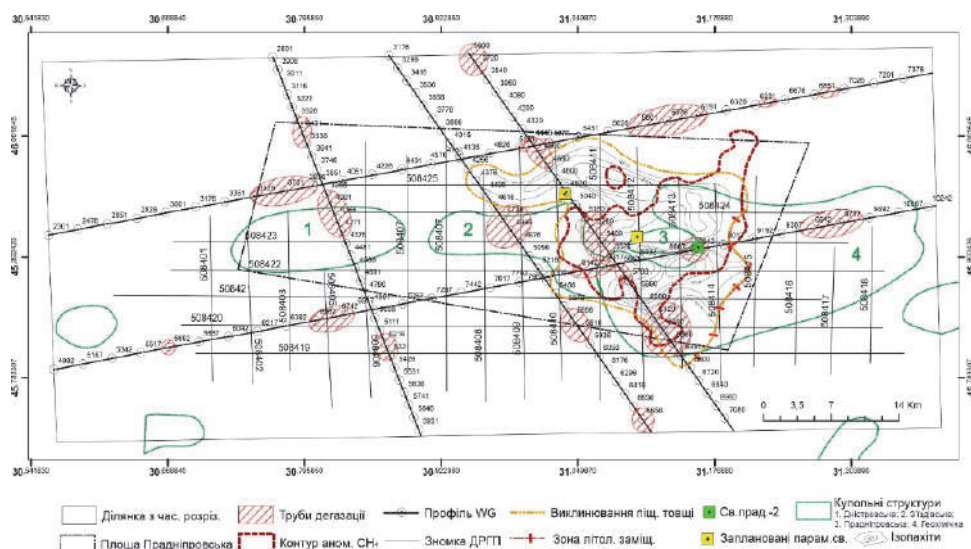


Рис. 2. Схема розташування часових сейсмічних профілів фірми «Western Geophysical» у межах Прадніпровської структури та ТД.

Геолого-структурний аналіз передбачав створення детальної схеми розломно-блокової будови досліджуваної перспективної ділянки, виявлення зон підвищеної проникності та визначення маршрутів активної міграції вуглеводнів. На основі цих даних сформовано геолого-структурну карту, яка відображає просторову організацію структур та потенційно сприятливі ділянки для акумуляції вуглеводнів (рис. 3).

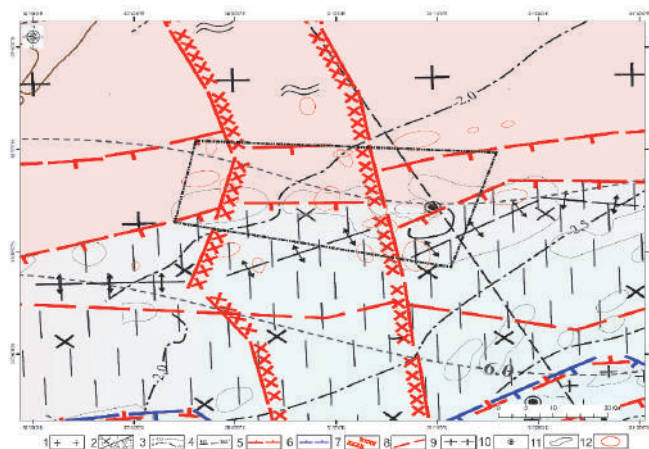


Рис. 3. Фрагмент структурно-тектонічної карти в межах Прадніпровської площі (побудовано за Чумак та ін., 2007) з доповненнями автора

Легенда: 1) Південно-Українська монокліза; 2) Крайова область деструкції докембрійського фундаменту: а) грабени; б) горсти (заштрихований крайовий горст); 3) Ізогіпси (км): а) підшови осадового чохла; б) підшови відкладів нижньої крейди; 4) Лінії геолого-геофізичних розрізів; 5) Скиди та скидо-флексурні дислокації; 6) Насуви фанерозойського віку, закладені на герцинському фундаменті; 7) Зони докембрійських розломів; 8) Інші порушення в осадовому чохлі; 9) Осі антиклінальних перегинів; 10) Глибокі свердловини; 11) Купольні структури; 12) Труби дегазації.

Одним із ключових факторів транспорту глибинних вуглеводневих компонентів є диз'юнктивні тектонічні порушення. Таким чином у межах виділених структурних зон створюються сприятливі умови для формування як «заповнених» скупчень, так і «транзитних» каналів руху скупчень вуглеводнів, за умови наявності специфічного комплексу геологічних чинників, що забезпечують фіксацію і можливу акумуляцію флюїдів.

Отримані дані газової хроматографії становлять важливий етап у формуванні геохімічного ознакового блоку. На площі Прадніпровська були виявлені: CH_4 , C_2H_4 , C_2H_2 , C_3H_8 , C_3H_6 , C_4H_{10} , iC_4H_{10} , C_4H_8 , C_5H_{12} , iC_5H_{12} , C_5H_{10} .

Для виділення аномалій глибинного флюїду важливо спочатку розділити метан на абіогенний та біогенний. Абіогенний метан супроводжується гомологами, алкенами та алкінами, більшість з яких не утворюються при температурах біогенного метану. Деякі вуглеводневі гази, як-от ацетилен, формуються лише при $>1400^\circ\text{C}$, що відповідає глибині понад 45 км (Yanko et al., 2024).

Температури формування газів варіюють: алкіни $\approx 1400^\circ\text{C}$, алкени $500\text{--}800^\circ\text{C}$, алкани $80\text{--}200^\circ\text{C}$, що дозволяє припустити, що така суміш газів сформувалась у результаті висхідного диференційного, швидше за все телескопічного потоку з великих глибин.

Для кількісного поділу метану застосовують коефіцієнт MHR (Methane to Higher Hydrocarbon Ratio) (Milkov & Etiope, 2018): $\text{MHR} < 100$ – абіогенний, $100\text{--}1000$ – змішаний, >1000 – біогенний (рис. 4).

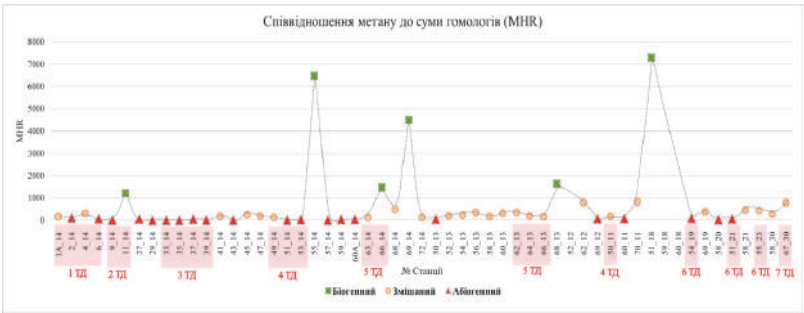


Рис. 4. Графік співвідношення метану до суми гомологів (MHR). Червоними стовпцями позначено станції пробовідбору, що потрапляють у зони семи окреслених ТД.

На графіку чітко виділяються точки з біогенним метаном, а також у значній кількості — точки з абіогенним і змішаним метаном. Таким чином, у межах площі явно переважає абіогенний і змішаний метан. При цьому досить чітко простежується зв'язок виходів абіогенного метану з ТД.

На карті розподілу абіогенного метану (рис. 5) видно, що аномалії метану охоплюють площі, які перевищують контури геофізичних ТД, що свідчить про взаємодію флюїдного потоку з донними відкладами.

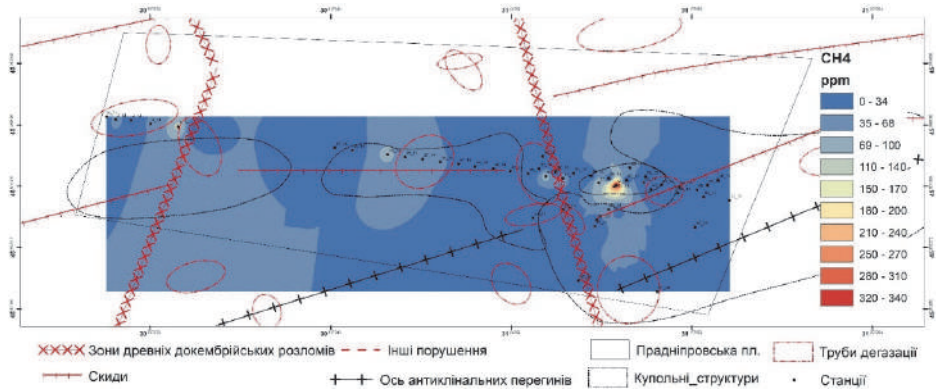


Рис. 5. Інтерполяція та концентрація абіогенного метану з купольними структурами.

Очевидно що важливим фактором фіксації на дні ГФП будуть особливості мінералів в донних відкладах. Порівняння літологічних умов на площі з аномаліями у розподілі CH_4 показало, що прямого зв'язку між ними немає, оскільки ця площа складена виключно мулами (Аврамець В. М. та ін. 2007). Відмінності в мулах обумовлені переважно кількістю черепашкового матеріалу. Мули представлені глинистими мінералами з невеликою кількістю (1–5%) індивідів мезорозміру.

У зв'язку з цим було прийнято рішення провести детальне дослідження глинистих мінералів. Аналіз показав, що глиниста фракція переважно однорідна та представлена гідрослюдами, монтморилонітом, каолінітом, хлоритом і мінералами зі порушеною структурою. Ступінь кристалічної досконалості варіює, що дозволило розділити дебаєграми на п'ять груп.

Аналіз просторового розподілу кожної групи на площі показав: група А відповідає ділянкам із максимальними значеннями газового потоку, група В — змінам мінералів у межах труб дегазації, групи С і D — подібні до групи А, але в безкварцевих осадах, група Е — охоплює ділянки, не порушені впливом газового флюїду. Звертає на себе увагу те, що зразки групи А містять найбільшу кількість змішаношарових мінералів, тоді як у групі Е такі мінерали відсутні. Групи В, С і D займають проміжне положення (рис. 6).

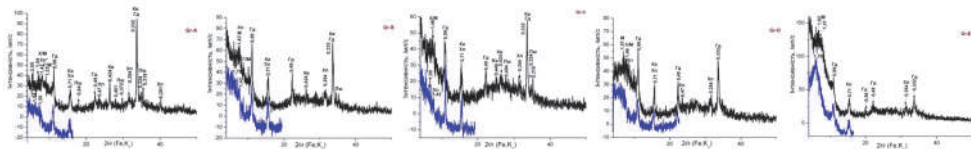


Рис. 6. Результати рентген-дифрактометричних аналізів. Мінеральний склад пелітової фації: Основний – Гд – гідрослюда, Хл – хлорит, Х* – набухаючий хлорит, Ка – каолініт, М – монтморилоніт. Домішки: невпорядкована 3М утворення: Х/М – хлорит-монтморилоніт, Г/М – гідрослюда-монтморилоніт, Кв – кварц, Пш – польовий шпат.

Для перевірки впливу флюїдного потоку на структуру мінералів проби обробили кислотою та прожарили: кислота не спричинила змін, а після прожарювання більшість змішаношарових мінералів зникла, і їхня структура стала подібною до групи Е. З точки зору автора підвищення кількості змішаношарових мінеральних фаз в зонах впливу флюїду, в свою чергу може свідчити про різний ступінь сорбційних можливостей вуглеводних газів в міжплощинні простори. При чому сорбційні властивості монтморилоніту і гідрослюд суттєво вище чим каолініту і хлориту.

Важливими для характеристики складу флюїдного потоку є дослідження чл.-кор. Ігоря Наумка (2006), де вивчалися **газорідинні включення у аутигенних і алотигенних** мінералах керна свердловини Прадніпровська-2. У прожилках, складених кальцитом, який заліковував тріщини в юрських (?) вапня-

ках з глибини 2265–2375 м зафіксовано понад 85% метану, що свідчить про проникнення глибинних флюїдів і їх фіксацію під час мінералоутворення. Подібні дослідження на інших структурах північно-західного шельфу Чорного моря підтвердили приплив флюїдів із глибинних горизонтів, тобто вертикальну міграцію.

Поряд із глинистими мінералами, мінеральною матрицею, здатною фіксувати флюїдний потік у середовищі, є *біогенні карбонати*, насамперед — мушлі та черепашки короткоживучих мейобентосних організмів. Їхня сингенетична процесу флюїдогенеза мінеральна матриця є стабільним носієм хімічної та ізотопної інформації, яка дозволяє реконструювати умови мінералоутворення та джерела флюїдів.

На основі кількісних характеристик (24 елементів) статистично виділені три групи: макроелементи, мезоелементи та мікроелементи. Серед *першої групи* чітко розрізняються елементи, які ізоморфно вбудовуються в структуру кальциту або арагоніту (Na, Mg, Sr, Fe, Mn, K), та елементи, які захоплюються як неструктурні домішки в процесі аглютинації під час росту біогенного карбонату (Si, S і P). *Другу групу* можна поділити умовно на дві підгрупи. Одна пов'язана з утворенням сульфідних мінералів, парагенетичних до біогенного кальциту (As, Zn, Cu, Pb), а інша — з аглютинацією глинистих мінералів із відкладів (Al, Ti) або особливістю ізоморфізму в біогенному утворенні карбонату кальцію (Ba). *Третя група* пов'язана з елементами з низьким вмістом і нерівномірним розподілом (Ni, V, Cr, Co, Mo, Tl, Se). Основною групою тут є Ni, Cr, Co, V. На думку автора, ця асоціація пов'язана з тією частиною флюїду, яка бере початок або в нижній частині земної кори, або ж у мантиї. Додатково було проаналізовано питання можливого зв'язку цих елементів із техногенним забрудненням. Отримані матеріали свідчать, що активного забруднення з таким набором елементів на такій відстані від берега не спостерігається (Дікол, 2023). Таким чином, дослідження типоморфізму хімічного складу карбонату показує, що в його утворенні брали участь хімічні елементи, пов'язані зі складом морської води та донних відкладів, пов'язані з потоком флюїдів, що проходить через земну кору, та елементи, що вказують на те, що флюїд міг привнести верхньої мантиї (рис. 7).

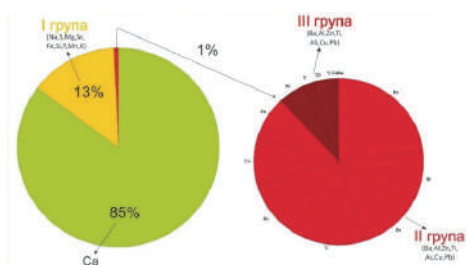


Рис. 7. Співвідношення хімічних елементів у мушлях *Mytilus galloprovincialis*.

Окремо автором були проведені **аналізи ізотопії вуглецю та кисню**. Ізотопні ($\delta^{13}\text{C}$, $\delta^{18}\text{O}$) підписи вивчались із черепашок форамініфер і мушлів молюсків і використовувались для оцінки джерел і механізмів біогенного або абіогенного утворення метану та можливих індикаторів генетичних, так і епігенетичних процесів у морських відкладах, відповідно. За даними Pierre та Fouquet (2007), середнє значення $\delta^{13}\text{C}$ у карбонаті морських осаdів за нормальних умов становить близько +1,0‰ V-PDB. Найстабільніший ізотопний склад мають форамініфери: +2,0...+1,9‰ та +0,2+3,6‰, у середньому 1,6‰ (Gross, 1964).

У зразках, відібраних у межах площі, значення $\delta^{13}\text{C}$ у мушлях молюсків варіюють від +1,57‰ до -0,41‰ (+1‰), тоді як у раковинах форамініфер — від +1,53‰ до -0,82‰ (+0,4‰), при повному домінуванні позитивних значень в обох групах організмів (рис 8).

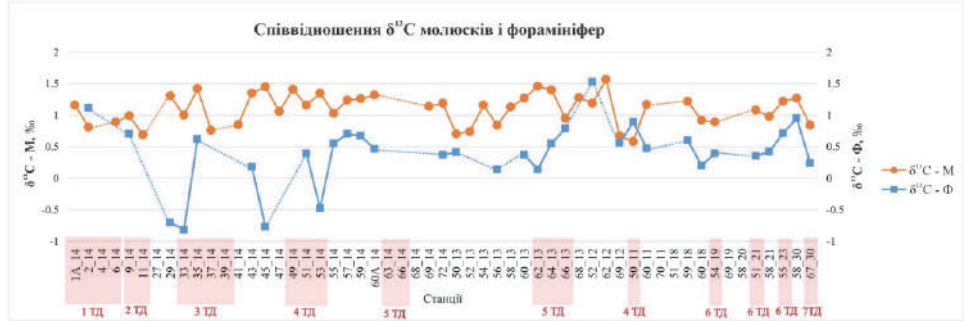


Рис. 8. Графік взаємозв'язку $\delta^{13}\text{C}$ між раковинами молюсків (*Cardium (Cerastoderma) edule*, позначено як М) та форамініфер (*Ammonia tepida*, позначено як Ф).

Дані свідчать, що форамініфери на невеликій глибині перебувають у середовищі з активним обміном CO_2 між водою та атмосферою, що збагачує їхні раковини ^{13}C . Черепашки бентосних форм переважно мають позитивні $\delta^{13}\text{C}$, хоча поодинокі негативні значення пов'язані зі змінами складу придонних вод і підвищеним потоком органічної речовини. Підвищені $\delta^{13}\text{C}$ можуть вказувати на зменшення надходження органічного вуглецю та менш інтенсивні діагенетичні процеси (Yanko et al., 2024).

У сучасних дослідженнях $\delta^{18}\text{O}$ розглядають як індикатор генетичних та епігенетичних процесів у морських відкладах, однак питання про зв'язок від'ємних значень $\delta^{18}\text{O}$ з насиченістю відкладів вуглеводнями залишається відкритим.

У цій роботі $\delta^{18}\text{O}$ у молюсків варіює від +0,6 до -2,9‰, у форамініфер – від +0,8 до -2,07‰, при цьому переважають негативні значення (рис. 9). Це може свідчити про збагачення киснем ^{16}O під впливом вуглеводневих флюїдів. Найнижчі показники характерні для зразків із ТД, що може вказувати на вплив глибинних флюїдів на ізотопну структуру біогенних карбонатів (Дікол, 2025), однак для підтвердження цього необхідні дослідження з більшою вибіркою.

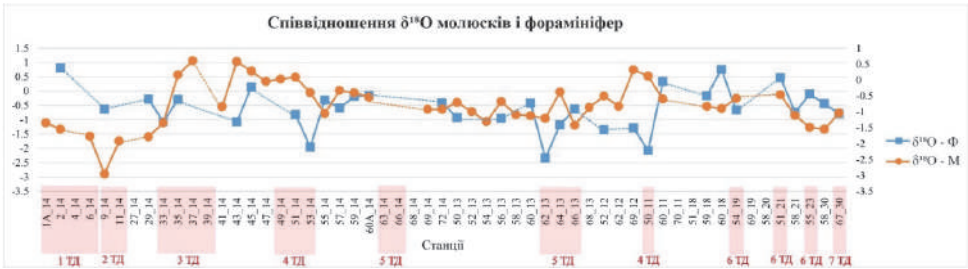


Рис. 9. Графік взаємозв'язку $\delta^{18}\text{O}$ між раковинами молюсків (*Cardium (Cerastoderma) edule*, позначено як М) та форамініфер (*Ammonia tepida*, позначено як Ф).

Для порівняння: середній склад об'ємного карбонату морських відкладів становить $\delta^{18}\text{O} \approx +0,6\text{‰}$ (Pierre & Fouquet, 2007), а у бентосних форамініфер $+2,63...+3,68\text{‰}$ (Cen et al., 2023), що значно вище отриманих у цьому дослідженні значень.

Наступне питання, що потребувало вирішення, стосувалося можливості використання біоіндикації флюїдного потоку безпосередньо у спільнотах мейобентосних організмів. **Біоіндикаційний філогенетичний аналіз** включав дослідження форамініфер і нематод по всіх точках опробування на площі. Було ідентифіковано 12 таксонів форамініфер та 40 таксонів нематод та підраховано їх кількісну складову (рис. 10) (Yanko et al, 2024).

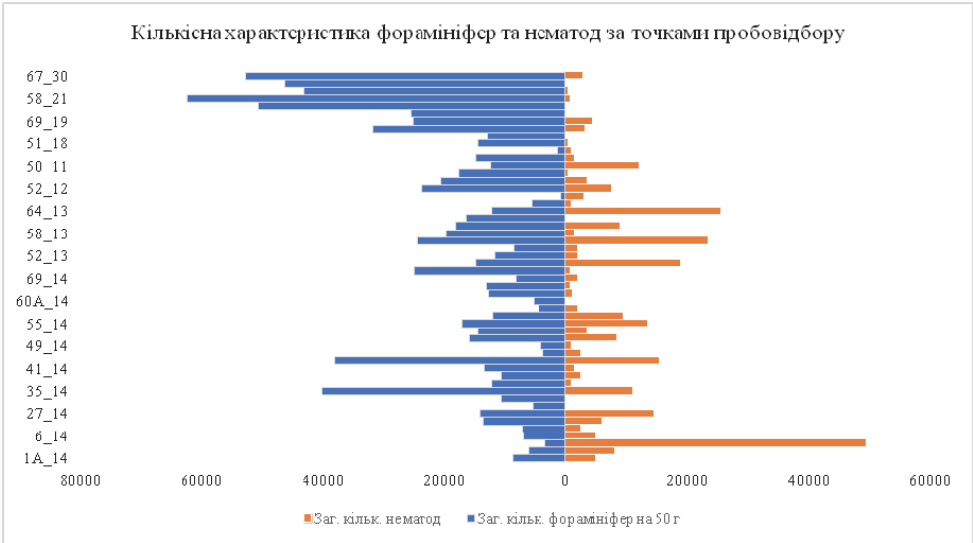


Рис. 10. Графік співвідношення кількості нематод та форамініфер на станціях пробовідбору.

Було визначено групи організмів за їхньою толерантністю або чутливістю до CH_4 , C_3H_8 , C_4H_{10} , C_5H_{12} , C_2H_4 , C_3H_6 , C_2H_2 , C_4H_8 . Кореляційний аналіз показав позитивні та негативні зв'язки між форамініферами й параметрами навколишнього середовища, але без кореляції з вуглеводневими газами, тоді як кореляційний аналіз нематод засвідчив, що *Cobbionema acrocerca*, *Microilaimus ponticus*, *Daptonema maeoticum*, *Sabatieria pulchra* негативно корелюють з CH_4 , тоді як низка видів (*Enoplos quadridentatus*, *Viscosia minor*, *Symplocostoma tenuicolle*, *Halalaimus ponticus*, *Dichromadora cephalata*, *Neochromadora poecilomoides*, *Etmolaimus multipapillatus*, *Paracanthochus caecus*, *Leptolaimus steineri*, *Monhystera longicapitata*, *Sphaerolaimus ostreae*, *Paralinhomoeus filiformis*) – з його гомологами. Водночас *Neochromadora poecilomoides* та *Monhystera longicapitata* демонструють позитивну кореляцію з C_2H_2 , що може свідчити про їхню індикативність глибинних процесів, оскільки C_2H_2 характерний для більш глибоких шарів землі.

Важливим результатом цього аналізу стало виявлення лагенід (Lagenida) у мілководних ділянках, де їх раніше не фіксували. Це можна розглядати як індикатор впливу вуглеводневих газів (Yanko et al., 2024). Просторово простежується їх тяжіння до труб дегазації та зон розривних порушень. Також філогенетичні дослідження показали, що форамініфери переважно характеризуються меншими розмірами, зниженням різноманіття та щільності на територіях із впливом вуглеводневих газів, хоча є й винятки, що потребують додаткового вивчення (Yanko et al., 2024).

Мультидисциплінарний підхід до аналізу особливостей глибинного флюїдного потоку, здійснений на основі випробування конкретної площі, дозволив не лише виявити відмінності в характеристиках між ділянками з проявами флюїдного потоку та без них, але й визначити кількісні межі цих змін. Це дало змогу, прийнявши вивчені характеристики як модельні ознаки, запропонувати кількісно-генетичну модель.

Кількісно-генетична модель являє собою опис об'єкта досліджень у модельних ознаках, детермінованих до походження. При досягненні поставленої мети, такими модельними ознаками будуть геофізичні, геолого-структурні — які, як відмічалось раніше, являються необхідними умовами (прогнознi критерії) для пошуково-розвідувальних робіт на вуглеводні і достатніми умовами (пошукові ознаки) газогеохімічні, мінералогічні, термобарогеохімічні, хіміко-ізотопні, біоіндикаційні (Табл. 1).

ВИСНОВКИ

У ході комплексного дослідження площі Прадніпровська на сейсмічних профілях зафіксовано зони втрати кореляції з великих глибин, які інтерпретуються як труби дегазації. Вони просторово тяжіють до розривних порушень, що слугують одними з основних каналів транспорту глибинних флюїдів. В донних відкладах виявлено наявність важких алканів $\text{C}_4\text{--C}_5$, присутність алкенів та алкінів. Глинисті мінерали та біогенні карбонати відображають у зонах дега-

Таблиця 1
Кількісні характеристики модельних ознак, що дозволяють перевести модель у кількісно-генетичний стан

	Пара-метри	Результат впливу ГФП (Якісна та кількісна характеристика)	Стан без впливу ГФП (Якісна та кількісна характеристика)
Умови необхідності виявлення ГФП (прогностні критерії)	Геофізичні	(+) Зони втрати кореляції з великих глибин, труби дегаззації на часових розрізах.	(-) Відсутність ефектів зниження акустичної прозорості, «затухання» хвиль, появи плямистих або хаотичних відбиттів і «сліпих зон». Кореляція шарів збережеться.
	Геолого-структурні	(+) Розломно-блокова будова ділянки, ідентифікація зон підвищеної проникності та визначення шляхів активної міграції вуглеводнів. Один із головних чинників транспорту глибинних вуглеводневих компонентів - диз'юнктивні тектонічні порушення.	(-) Неактивна тектоніка, відсутність ТД і слідів руху флюїду.
Умови, достатні для виявлення ГФП (пошукові ознаки)	Газогеохімічні	-Наявність CH ₄ в діапазоні 10-350 ppm, -наявність важких алканів C ₄ -C ₅ ; -присутність алкенів -присутність алкінів (переважно C ₂ H ₂) -MHR <100	-Наявність CH ₄ в діапазоні 0-10 і від 400 до 3000 ppm (аномалії біогенного CH ₄ ; -відсутність важких алканів C ₄ -C ₅ ; -відсутність алкенів -відсутність алкінів -MHR >100
	Мінералогічні	Змішаношарові мінерали з сорбційними властивостями що руйнуються при проколюванні.	Відсутність змішаношарових мінералів.
	Термобаро-геохімічні	Наявність CH ₄ у газорідких включеннях в аутигенних і алотигенних мінерах мезорозміру, понад 85% CH ₄ , низьким складом CO ₂ <12 і N ₂ <2 і високою газонасиченістю ≈1,000	Низький склад CH ₄ <30% і високий CO ₂ >65, N ₂ >10, відносно низьке газонасичення <0,070.
	Хімічні	Вміст у мушлях моллюсків Ni від 47 до 55 ppm і вище , Cr 35-50 і вище, V 20-30 і вище, Co 8-11 і вище.	Вміст у мушлях моллюсків Ni <40 ppm, Cr <20 ppm, V <15 ppm, Co <5 ppm.
	Ізотопні	δ ¹³ C Мол.: +1,57‰ до -0,41‰ (+1‰), Форам.: +1,53‰ до -0,82‰ (+0,4‰); δ ¹⁸ O Мол.: +0,6 до -2,9‰ (-1,15‰), Форам.: +0,8 до -2,07‰ (-0,64‰).	δ ¹³ C карбонатних відкладів: +1,0‰, Форам.:+2,0...+1,9‰ та +0,2+3,6‰ (1,6‰); δ ¹⁸ O карбонатних відкладів: ≈ +0,6‰, Форам.: +2,63...+3,68‰ (+3,16‰).
	Біоіндикаційні	Наявність лагенід, різноманітність, чисельність і ріст форамініфер і нематод, присутність нематод <i>Neochromadora poecilosomoides</i> та <i>Monhyстера longicapitata</i> .	Відсутність лагенід, більші розміри та чисельність форамініфер, а також підвищена щільність і видове різноманіття нематод.

зації характерне зростання кількості змішаношарових мінералів і аномальних концентрацій Ni, Cr, Co, V. Значення $\delta^{13}\text{C}$ у форамініферах і моллюсках варіюють від позитивних до слабко негативних, демонструючи тенденцію до деякого збільшення в областях розвантаження флюїдів. Переважно негативні значення $\delta^{18}\text{O}$ у зонах дегазації можуть вказувати на сталість глибинного джерела. Ідентифіковані 12 таксонів форамініфер і понад 40 нематод. Їхня реакція на гази різна: одні форми зменшують чисельність і різноманітність, інші демонструють стійкість. Важливим індикатором є поява лагенід на мілководді, а також позитивна кореляція окремих видів нематод із ацетиленом, що може вказувати на глибинні процеси. Сформовано кількісно-генетичну модель ГФП, яка дозволяє визначати найбільш достовірні ділянки їх розвантаження в донних відкладах за прогностичними критеріями та пошуковими ознаками. Достовірність моделі зростає при комплексній інтерпретації всіх параметрів, а вибір методів базувався на їх доступності в лабораторіях геологічних організацій України.

СПИСОК ВИКОРИСТАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ

Звіт з проведення геологічної зйомки масштабу 1:200 000 північно-західної частини шельфу Чорного моря в межах аркушів L-36-XIII, XIV, XV / В. М. Аврамець, С. Д. Какаранза, М. Г. Сибірченко, В. Є. Рокицький, В. М. Русаков та ін. Київ : ДГП «Геоінформ», Причорномор ДРГП, 2007. 462 с.

Геолого-геохімічні дослідження при проведенні нафтогазопошукових робіт на морському шельфі / І. О. Сучков, Л. П. Пономарева, В. В. Бацко, В. С. Нагребельський, І. О. Гончарова, Е. Я. Нетребська. *Збірник наукових праць Інституту геологічних наук НАН України*. 2018. Вип. 11. С. 76–82. http://nbuv.gov.ua/UJRN/znpign_2018_11_12

Дікол О. С. Прояви вуглеводневої дегазації в донних відкладах північно-західного шельфу Чорного моря та їх генетична інтерпретація : дис. ... д-ра філос. : 103 – Науки про Землю. Київ : НАН України, Ін-т геол. наук, 2025. 188 с.

Дікол О. С. Хімічний склад раковин моллюсків *Mytilus* як показник глибинних флюїдних потоків на шельфі Чорного моря. *Геологічна будова та корисні копалини України* : зб. тез Всеукр. молодіж. наук. конф. (Київ, 2–3 жовтня 2023 р.). Київ : НАН України, Ін-т геохімії, мінералогії та рудоутворення ім. М. П. Семениченка, 2023. С. 67. ISBN 978-966-999-648-2.

Коморний А., Сітковська Н. Звіт про тематичні роботи за темою «Комплексна інтерпретація геолого-геофізичних матеріалів зони крайового уступу північно-західного шельфу Чорного моря» (№ держреєстрації У-06-161 (М/4)). Київ : ДГП «Укргеофізика», ІПЦМГД «Одесморгеологія», 2007. Архів ДГП «Укргеофізика». 94 с.

Комплексне тлумачення чинників і параметрів продуктивних вуглеводневих структур / О. В. Чепіжко, В. В. Янко, В. М. Кадурін, І. М. Наумко, С. М. Шаталін, І. М. Шураєв. *Вісник Одеського національного університету. Географічні та геологічні науки*. 2020. Т. 25, вип. 2(37). С. 289–309. [https://doi.org/10.18524/2303-9914.2020.2\(37\).216578](https://doi.org/10.18524/2303-9914.2020.2(37).216578)

Лукин А. Е., Шестопалов В. М. От новой геологической парадигмы к задачам региональных геолого-географических исследований. *Геофизический журнал*. 2018. Т. 40, вып. 4. С. 3–72. <https://doi.org/10.24028/gzh.0203-3100.v40i4.2018.140610>

Наумко І. М. Флюїдний режим процесів мінералогенезу породно-рудних комплексів України (за включеннями у мінералах типових парагенезисів) : автореф. дис. ... д-ра геол. наук. Львів, 2006. 52 с.

Gross M. G. Variations in the $\text{O}^{18}/\text{O}^{16}$ and $\text{C}^{13}/\text{C}^{12}$ ratios of diagenetically altered limestones in Bermuda Islands. *Journal of Geology*. 1964. Vol. 72, iss. 2. P. 170–198.

Influence of methane and its homologues on foraminifera and nematodes in the Northwestern part of the Black Sea / V. Yanko, A. Kravchuk, T. Kondariuk, I. Kulakova, V. Kadurin, O. Dikol, S. Kadurin. *Marine Environmental Research*. 2024. Vol. 193. Article 106285. <https://doi.org/10.1016/j.marenvres.2023.106285>

Milkov A. V., Etiope G. Revised genetic diagrams for natural gases based on a global dataset of >20,000 samples. *Organic Geochemistry*. 2018. Vol. 125. P. 109–120. <https://doi.org/10.1016/j.orggeochem.2018.09.002>

Pierre C., Fouquet Y. Authigenic carbonates from methane seeps of the Congo deep-sea fan. *Geo-Marine Letters*. 2007. Vol. 27, iss. 2–4. P. 249–257. <https://doi.org/10.1007/s00367-007-0081-3>

REFERENCES

- Avramets, V. M., Kakaranza, S. D., Sybirchenko, M. H., Rokytskyi, V. Ye., Rusakov, V. M., et al. (2007). *Zvit z provedennia heolohichnoi ziomky masshtabu 1:200 000 pivnichno-zakhidnoi chastyny shelfu Chornoho moria v mezhakh arkushiv L-36-XIII, -XIV, -XV* [Report on geological mapping at scale 1:200,000 of the northwestern part of the Black Sea shelf within sheets L-36-XIII, -XIV, -XV] (462 p.). Kyiv: DHP “Geoinform”, Prychornomor DRHP. [in Ukrainian].
- Suchkov, I. O., Ponomareva, L. P., Batsko, V. V., Nahrebetskyi, V. S., Honcharova, I. O., & Netrebska, E. Ya. (2018). Heoloho-heokhimichni doslidzhennia pry provedenni naftohazoposhukovykh robot na morskomu shelfi [Geological and geochemical studies during oil and gas exploration on the marine shelf]. *Collection of Scientific Works of the Institute of Geological Sciences of the NAS of Ukraine*, (11), 76–82. http://nbuv.gov.ua/UJRN/znpign_2018_11_12 [in Ukrainian].
- Dikol, O. S. (2025). *Proiavy vuhlevodnevnoi dehzatsii v donnykh vidkladakh pivnichno-zakhidnoho shelfu Chornoho moria ta yikh henetychna interpretatsiia* [Manifestations of hydrocarbon degassing in bottom sediments of the northwestern Black Sea shelf and their genetic interpretation] [PhD thesis in Earth Sciences, National Academy of Sciences of Ukraine, Institute of Geological Sciences, 188 p.]. Kyiv. [in Ukrainian].
- Dikol, O. S. (2023). Khimichniy sklad rakovyn moliuskiv Mytilus yak pokaznyk hlybynykh fluידnykh potokiv na shelfi Chornoho moria [Chemical composition of Mytilus shells as an indicator of deep fluid flows on the Black Sea shelf]. *Heolohichna budova ta korysni kopalyny Ukrainy: Proceedings of the All-Ukrainian Youth Scientific Conference* (Kyiv, October 2–3, 2023) (p. 67). Kyiv: NAS of Ukraine, Institute of Geochemistry, Mineralogy and Ore Formation. ISBN 978-966-999-648-2. [in Ukrainian].
- Komorny, A., & Sitkovska, N. (2007). Zvit pro tematychni roboty za temoiu “Kompleksna interpretatsiia heoloho-heofizychnykh materialiv zony kraiovoho ustupu pivnichno-zakhidnoho shelfu Chornoho moria” [Report on thematic works on the topic: “Complex interpretation of geological and geophysical materials of the marginal scarp zone of the northwestern Black Sea shelf”] (State reg. no. U-06-161 (M/4). Arkhiv DHP “Ukrheofizyka” (94 p.). Kyiv: DHP “Ukrheofizyka”, TsMGDD “Odesmorgeolohiia”. [in Ukrainian].
- Chepizhko, O. V., Yanko, V. V., Kadurin, V. M., Naumko, I. M., Shatalin, S. M., & Shuraiev, I. M. (2020). Kompleksne tлумachennia chynnykiv i parametriv produktyvnykh vuhlevodnevnykh struktur [Comprehensive interpretation of factors and parameters of productive hydrocarbon structures]. *Odesa National University Herald. Geography & Geology*, 25(2(37)), 289–309. [https://doi.org/10.18524/2303-9914.2020.2\(37\).216578](https://doi.org/10.18524/2303-9914.2020.2(37).216578) [in Ukrainian].
- Lukin, A. E., & Shestopalov, V. M. (2018). Ot novoy geologicheskoy paradigmy k zadacham regionalnykh geologo-geofizicheskikh issledovaniy [From the new geological paradigm to the tasks of regional geological and geophysical research]. *Geophysical Journal*, 40(4), 3–72. <https://doi.org/10.24028/gzh.0203-3100.v40i4.2018.140610> [in Russian].
- Naumko, I. M. (2006). Fluידnyi rezhym protsesiv mineralohenezu porodnorudnykh kompleksiv Ukrainy (za vkluchenniamy u mineralakh tipovykh parahezysiv) [Fluid regime of mineralization processes in rock-ore complexes of Ukraine (based on inclusions in minerals of typical parageneses)] [Extended abstract of doctoral dissertation, 52 p.]. Lviv. [in Ukrainian].
- Gross, M. G. (1964). Variations in the O^{18}/O^{16} and C^{13}/C^{12} ratios of diagenetically altered limestones in Bermuda Islands. *Journal of Geology*, 72(2), 170–198.
- Yanko V., Kravchuk A., Kondariuk T., Kulakova I., Kadurin V., Dikol O., Kadurin S. (2024). Influence of methane and its homologues on foraminifera and nematodes in the Northwestern part of the Black Sea. *Marine Environmental Research*, 193, 106285. <https://doi.org/10.1016/j.marenvres.2023.106285>
- Milov, A. V., & Etiope, G. (2018). Revised genetic diagrams for natural gases based on a global dataset of >20,000 samples. *Organic Geochemistry*, 125, 109–120. <https://doi.org/10.1016/j.orggeochem.2018.09.002>
- Pierre, C., & Fouquet, Y. (2007). Authigenic carbonates from methane seeps of the Congo deep-sea fan. *Geo-Marine Letters*, 27(2–4), 249–257. <https://doi.org/10.1007/s00367-007-0081-3>

Стаття надійшла 01.10.2025 р.

O. S. Dikol

Odesa I. I. Mechnikov National University,
Department of Marine Geology, Hydrogeology, Engineering Geology, and
Paleontology
2b Shampanskyi Ln, Odesa, 65058, Ukraine

SIGNS OF DEEP HYDROCARBON FLUIDS IN BOTTOM SEDIMENTS OF THE PRADNIPROVSK AREA BASED ON COMPREHENSIVE RESEARCH DATA

Abstract

Problem Statement and Purpose. Intense degassing phenomena are recorded on the northwestern shelf of the Black Sea, which are potentially reflected in bottom sediments. The goal is to identify and characterize DFF manifestations in the bottom sediments of the Pradniprovsk area, trace their discharge channels, and provide a genetic interpretation of complex data, which allows for the formation of a quantitative-genetic model as a search tool.

Data & Methods. The study was conducted using an interdisciplinary approach: interpretation of seismic time sections, gas chromatography of 55 bottom sediment samples (CH_4 , its homologues, alkenes, alkynes), X-ray diffraction of 38 samples with control influences (HCl , 550°C) to separate chemical and structural factors, analysis of gas-liquid inclusions in minerals, chemical analysis of *Mytilus galloprovincialis* shells (Na, Mg, Sr, Fe, Mn, K; Si, S, P; Al, Ti, Ba; Ni, V, Cr, Co, etc.), Isotopy: $\delta^{13}\text{C}$ and $\delta^{18}\text{O}$ in *Cardium edule* and *Ammonia tepida* (mass spectrometry) and Bioindication: qualitative and quantitative accounting of foraminifera and nematodes, correlation analysis with hydrocarbon gases.

Results. Seismic profiles have identified zones of correlation loss, which can be traced from great depths and interpreted as degassing pipes. They are associated with fracture systems that function as one of the main channels for DFF transport. Gas chromatography detected CH_4 , its homologues (up to C_5), alkenes, and C_2H_2 . According to MHR, abiogenic and mixed types of methane prevail in the area, with abiogenic methane spatially associated with degassing pipes. In the clay fraction, an increase in the proportion of mixed-layer phases was observed in the areas affected by the fluid. Thermobarogeochemical data from inclusions (over 85% CH_4 in Jurassic calcite veins) confirm episodes of intense hydrocarbon phase influx from the depths. Chemical analyses in biogenic carbonates show enrichment of Ni, Cr, V, and Co in degassing areas, which is consistent with the participation of a deep component. Isotopic values range from positive to slightly negative for $\delta^{13}\text{C}$ and predominantly negative for $\delta^{18}\text{O}$ in degassing zones, which is interpreted as evidence of a stable deep fluid source. The detection of lagunids in shallow waters and the positive associations of certain nematodes with C_2H_2 are considered indicators of deep-water processes. Based on the data obtained, a quantitative genetic model of DFF unloading was constructed.

Keywords: deep fluid flow, northwestern Black Sea shelf, degassing pipes, mixed-layer minerals, gas-liquid inclusions, $\delta^{13}\text{C}$, $\delta^{18}\text{O}$, bioindication, quantitative genetic model.