

УДК 550.382.3

DOI: <http://doi.org/10.17721/1728-2713.104.04>

Олександр МЕНЬШОВ, д-р геол. наук, ст. дослідник

ORCID ID: 0000-0001-7280-8453

e-mail: menshov@knu.ua

Київський національний університет імені Тараса Шевченка, Київ, Україна

ВПЛИВ МІГРАЦІЇ ФЛЮЇДІВ НА МАГНІТНУ МІНЕРАЛОГІЮ ҐРУНТІВ

(Представлено членом редакційної колегії д-ром геол. наук, проф. М.І. Орлюком)

Вступ. Війна в Україні актуалізувала необхідність інтенсифікації видобутку вуглеводнів на власній території для підтримання та розбудови енергетичної незалежності держави. Ефективність, низьковартісність та актуальність залучення демонструють магнітні методи дослідження верхньої частини геологічного розрізу та ґрунтового покриву з метою пошуків нафти і газу.

Методи. Методологія магнітних досліджень з метою пошуків вуглеводнів основана на методах дослідження магнетизму природних об'єктів та ґрунтового дію покриву, детальної магнітометрії природних систем та фізико-хімічних моделях зміни магнітної мінералогії під міграції вуглеводневого флюїду.

Результати. У дослідженні магнітної мінералогії ґрунтів важливим є розbraкування джерел формування цих мінералів. Здебільшого ґрунтовий покрив містить мінерали природного ґрунтоутворного походження, аутогенні вторинні магнітні мінерали, а також інколи детритові ультрадисперсні магнітні фази. Для України найпоширенішими магнітними мінералами ґрунтів ґрунтоутворного походження є магнетит, магеміт, гематит та гетит. У той же час досвід проведення магнітомінералогічних аналізів ґрунтів територій родовищ нафти і газу вказує на наявність сульфідів залізу. У першу чергу ідентифікується моноклінний піротин. Також у ґрунтах містяться й супутні гексагональний піротин, пірит, грейгіт. Наведено результати термомагнітних аналізів та петель гістерезису зразків ґрунтів з територій покладів вуглеводнів та проаналізовано їх мінеральний склад.

Висновки. Результати вивчення впливу міграції вуглеводневого флюїду на зміну мінерального складу ґрунтів вказує на значущу інформативність і перспективність впровадження методу у комплекс геологорозвідувальних робіт на різних етапах. Аутогенні зміни магнітних мінералів у верхній частині геологічного розрізу та ґрунтовому покриві, а також природне та антропогенне накопичення вуглеводневих продуктів у ґрунтах спричинює зміну магнітних властивостей та формує аномалії магнітного поля.

Ключові слова: ґрунтовий покрив, магнітні мінерали, магнітна сприйнятливість, флюїди, вуглеводні.

Вступ

Серед низки нових викликів, які поставила перед Україною війна, одним із ключових для підтримання та розбудови енергетичної незалежності є видобуток вуглеводнів на власній території. Актуальність запропонованих у рамках даної статті вишукувань можна розділити на загальну та безпосередньо наукову складові. Загальна актуальність та доцільність полягає в наявності низки управлінських рішень, які спонукають науковців до розробки нових ефективних алгоритмів і методів пошуків та розвідки родовищ нафти і газу. Зокрема, мова йде про загальнодержавну програму (<https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/3268-17#n14>), ряд рішень РНБО України (<https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/n0009525-15#n2>, <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/874/2019#Text>), діяльність Ради експертів з енергетичної безпеки при РНБО України, у тому числі розробку заходів щодо "...пошуку відновлюваних джерел енергії та альтернативних видів палива". Наведені державні програми актуалізують відповідність запропонованого дослідження у сфері національної безпеки України. Крім того, очевидно є важливість з науково-дослідницького боку. Низка закордонних публікацій, робіт дослідників в Україні, а також наші власні результати вже на даному етапі доводять важливість залучення магнітних методів дослідження верхньої частини геологічного розрізу та ґрунтового покриву з метою пошуків вуглеводнів. Отримано польові та лабораторні результати магнітометрії та вимірювання магнітних властивостей ґрунтів та нижчезалеглих геологічних шарів (Menshov et al., 2015). Розпочато побудову фізичних, геохімічних та математичних моделей впливу міграції вуглеводнів на зміну магнітної мінералогії, а також врахування ґрунтових (або ландшафтних аномалій), які пов'язані із природним магнетизмом ґрунтів та закономірностями геоморфологічної будови територій перспективних на поклади нафти і газу (Меньшов, 2018). Окреслені дослідження у свою чергу розділяються на

низку більш прецизійних і тонких завдань. Одним із них є потреба з'ясування та побудови магнітної моделі перетворень магнітних мінералів у ґрунтах та підстильних горизонтах за умови впливу міграції флюїду.

Отже, метою даної статті є продемонструвати сучасне бачення, алгоритм та інтерпретацію механізмів формування аутогенних (діагенетичних) мінералів у ґрунтовому покриві та підстильних горизонтах під впливом вуглеводнів.

Стан проблеми досліджень. Гравітаційні та магнітні дослідження дають змогу виявити аномалії, які пов'язані з особливостями фізичного розвитку гірських порід та ґрунтів (густина, магнітна сприйнятливості (MS, MC, X), намагніченість (IRM)), а комплексна інтерпретація допомагає зрозуміти форму та протяжність басейну, структурні неоднорідності, розташування розломів, глибину залягання фундаменту, наявність магматичних тіл (Craig, & Quagliaroli, 2020). У роботі (Gadirov et al., 2022) вивчалися особливості гравітаційного та магнітного полів, було порівняно отримані теоретичні результати з даними спостережень, проведено моделювання на родовищі Мурадханли Середньокуринської западини. Автори отримали від'ємні аномалії магнітного поля інтенсивністю у 20–30 нТл разом із пониженими значеннями магнітної сприйнятливості формувальних порід у зоні покладу. Зауважимо, що аномалії як магнітного поля, так і магнітних властивостей можуть бути різнознаковими і мати ознаки сильної пілоподібної дисперсії значень по профілю. Такі випадки відомі за одночасного розгляду результатів для Азербайджану та України в кооперації із зазначеними авторами (Gadirov et al., 2018).

У вивченні родовищ нафти і газу важливим є комплексування магнітних і геохімічних методів. Наприклад, у роботі (Sechman et al., 2020) проведено оцінку зв'язку між розподілом прямих і непрямих поверхневих геохімічних показників для території Зовнішніх Карпат Польщі. Дослідження включало аналіз молекулярного складу

зразків ґрунтового газу та вмісту кальциту, а також вимірювання магнітної сприйнятливості та pH зразків ґрунту. Дослідження містило 96 проб ґрунтового газу, відібраних із глибини 1,2 м, і 96 проб ґрунту, взятих із глибини 0,7–0,8 м. Максимальні концентрації метану, сумарних алканів C2–C5 та сумарних алканів C2–C4 становили: 2100, 10,43 та 0,772 ppm. Значення магнітної сприйнятливості змінювалися від 3,6 до $21,5 \times 10^{-8}$ м³/кг. Вторинні зміни мінерального складу ґрунтів підтверджують, що комплексна інтерпретація результатів, отриманих прямими та непрямими методами, є ще позитивним прикладом, який допомагає краще зрозуміти складний механізм міграції вуглеводнів. Зауважимо, що наведені результати підтверджують проведені нами дослідження Українських Карпат (Menshov et al., 2016).

Розглядаючи більш глибокі геологічні формації та вплив на їх магнітну мінералогію при міграції флюїдів, спостерігається (Badejo et al., 2021) підвищення магнітних параметрів на контактах газ-нафта та нафта-вода, що також незалежно ідентифікується за допомогою немагнітних методів. Зокрема, підвищення значень намагніченості викликано формуванням нового нанометричного оксиду заліза (магнетиту) і сульфіду заліза (грейгітової фази). Зауважимо, що близькі магнітні моделі було отримано і нами для України, що більш детально описано нижче.

Найвища інформативність магнітних методів досягається при комплексуванні з іншими геофізичними та геоінформаційними методами. Робота (De la Rosa et al., 2021) об'єднує спектральний аналіз супутникових зображень із магнітними та геохімічними даними гірських порід (магнітна сприйнятливість, ізотермічна залишкова намагніченість насичення, спектродіаметрія поглинання та рентгенівський дифракційний аналіз). Територією вишукувань є нафтоперспективний регіон на північному заході Венесуели (басейн Фалькон). Двоетапний кластерний аналіз виділив три кластери, пов'язані з різними рівнями змін у ґрунтах та підстильних породах (0,3–1 м). Крім того, вивчення магнетизму гірських порід та електронно-парамагнітного резонансу (EPR) зразків керну з нафтової свердловини у формації Vaca Muerta (пд. захід Аргентини) сприяв встановленню зв'язку між мікромагнітними аномаліями та глибинними резервуарами (Costanzo-Álvarez et al., 2019). Зокрема, термічна деградація керогену, що індукує формування дещо біодеградованої сирої нафти, впливає на первинні оксиди та сульфід заліза через дві діагенетичні стадії. На першому етапі відбувається часткове розчинення мінералів, а на другому діагенетичному етапі – заміна фрамбоїдального піриту аутогенним піритином, що виявлено за допомогою сканувальної електронної мікроскопії (SEM), аналізу термомагнітних кривих і залишкової намагніченості.

Формування магнітних аномалій та аутогенних мінералів під впливом міграції флюїдів можна розглядати і на більш глобальному рівні (Орлюк, & Пашкевич, 2012). У роботі (Lukin, 2014) відзначається, що останніми роками різко зросли оцінки вуглеводневого потенціалу земних надр, що пов'язано з відкриттям нафтових і газових гігантів на глибинах 4,5–10,5 км. Концентруючись у даному контексті на магнітометричних дослідженнях, слід враховувати результати (Пашкевич та ін., 2014; Орлюк, & Друкаренко, 2018), де наводяться дослідження магнітної сприйнятливості і щільності порід осадового чохла і кристалічного фундаменту з 8 свердловин, пробурених у північно-західній частині Дніпровсько-Донецького авлакогену, у межах Чернігівського сегменту, з метою встановлення зв'язку з його структурно-речовинними комплексами, а також з можливими шляхами проходження і скупчення

вуглеводнів. Крім того, щодо магнітної мінералогії відзначається, що підвищення магнітної сприйнятливості порід у процесі нагріву може бути пояснено переходами піритинової фази, а також, присутністю магемітової фази та її переходом у гематит (Друкаренко, & Орлюк, 2017).

Методи

Загальна методологія проведення магнітних досліджень з метою пошуків вуглеводнів основана на методах дослідження магнетизму природних об'єктів (у першу чергу ґрунтового покриву), детальної магнітометрії природних систем та фізико-хімічних моделях зміни магнітної мінералогії під дією міграції вуглеводневого флюїду.

Зокрема, існує кілька моделей таких процесів. Перша з моделей, запропонована в роботі (Donavan et al., 1979), включає утворення вторинного діагенетичного магнетиту в процесі міграції вуглеводнів і базується на заміщенні Fe³⁺ з гематиту на Fe²⁺ з магнетиту. Друга модель (Goldhaber, & Reynolds, 1991) основана на теорії, що аналізує магнітні мінерали сульфідів. Вона припускає, що заміщення піриту відіграє вирішальну роль у формуванні аутогенного новоутвореного магнітного мінералу піриту, який генерує аномалії магнітного поля та змінює магнетизм ґрунтів у присутності покладів вуглеводнів. У наведених вище процесах основну роль відіграють мікробіологічні та термохімічні процеси (Machel, 2001). Ще одна модель (Elmore, & Grawford), яка пояснює формування підвищеного ступеня магнетизму нафтогазовмісних осадових порід і ґрунтів, базується на залученні у дані процеси сидериту.

Інструментально та методично процес магнітних досліджень включає польовий і лабораторний етапи, а також комплексну обробку та інтерпретацію даних. У польових умовах проводять детальну магнітометрію по профілях або площадках. Паралельно вимірюють об'ємну магнітну сприйнятливості за допомогою портативних вимірювачів типу KT-7, ПІМВ-М і т. ін., також відбирають зразки.

Лабораторні вимірювання проводять як у магнітній лабораторії Київського національного університету імені Тараса Шевченка, так і лабораторіях партнерів: Центр прикладних наук про Землю університету Еберхарда Карла Тюбінгена, Геофізичному центрі Дурбеса, Королівському метеорологічному інституті Бельгії, університеті Мюнхена тощо. Усі зразки висушуються в природних умовах. Для вимірювання питомої магнітної сприйнятливості (χ) та її температурної залежності використовують капамісток KLY (Agico, Чехія), а для частотної залежності (χ_{fd}) – MS2 (Bartington).

MPMS3 (магнітометр Quantum Design) застосовують для вимірювання магнітного гістерезису, частотної залежності χ та залишкової намагніченості. MPMS3 забезпечує збір даних у діапазоні температур 1,8–400 K (–271,35 – +126,85 °C), діапазоні магнітного поля ± 7 Тл і частотному діапазоні 0,1 Гц – 1 кГц. Петлі гістерезису отримують при 30 Кельвінах (K) і при 300 K. Низькотемпературний аналіз залишкової намагніченості ґрунтів проводять у діапазоні температур від близько до 0 до 300 K. Вимірювач петлі гістерезису застосовують як альтернативний інструмент для отримання ізотермічних кривих намагніченості (гістерезис, зворотне поле) та отримання залишкової намагніченості у магнітному полі до 0,5 Тл.

Крім того, магнітно-мінералогічні вимірювання в магнітній лабораторії кафедри дослідження Землі та навколишнього середовища Мюнхенського університету Людвіга-Максиміліана включають вивчення термомагнітних параметрів, різних типів намагніченості та магнітної сприйнятливості, а також петель гістерезису за допомогою приладу Variable Field Translation Balance (VFTB).

VFTB забезпечує можливість вимірювання від -180 до $+800$ °C (одночасне вимірювання намагніченості та магнітної сприйнятливості), ізотермічної залишкової намагніченості IRM (повний діапазон температур), зворотного поля (повний діапазон температур), петлі гістерезису (повний температурний діапазон) і діаграми FORC. Завдяки своїй високій чутливості він є ідеальним інструментом для дослідження слабо магнітних матеріалів, таких як піщаник, вапняк, деякі ґрунти тощо. Для інтерпретації всіх цих даних використовують спеціальне програмне забезпечення RockMag Analyzer.

Результати

У дослідженні магнітної мінералогії ґрунтів важливим є розбрукування джерел формування цих мінералів. У більшості випадків ґрунтовий покрив вміщує мінерали ґрунтоутворного (педогенного) походження, аутогенні вторинні магнітні мінерали, а також іноді й детритові ультрадисперсні магнітні фази. Для України найпоширенішими магнітними мінералами ґрунтів педогенного походження є магнетит, магеміт, а також дещо більш складні у своїй ідентифікації гематит та гетит. У той же час досвід проведення магніто-мінералогічних аналізів ґрунтів з родовища нафти і газу вказує на наявність сульфідів залізу. У першу чергу ідентифікується моноклінний піротин. Також у ґрунтах містяться й супутні гексагональний піротин, пірит, а для більш глибокозалеглих геологічних горизонтів – грейгіт. Для ілюстрації зазначених даних наведемо кілька прикладів магніто-мінералогічних аналізів зразків з території покладів вуглеводнів.

У методиці магніто-мінералогічних досліджень одним із найбільш інформативних є термомагнітний аналіз. Комплекс термомагнітних вимірювань магнітної сприйнятливості та залишкової намагніченості при нагріванні та охолодженні до температури рідкого азоту дав змогу ідентифікувати основні магнітні фази для зразків родовища Орховича. Більш детально результати магнітометричних і магнітних досліджень опубліковані в нашій роботі (Menshov et al., 2015). На рис. 1 представлено термомагнітний аналіз магнітної сприйнятливості зразка ґрунту, відібраного поруч із свердловиною з частковим насиченням вуглеводневою речовиною. Крива нагрівання ідентифікує піротинову фазу як основний ферімагнітний мінерал.

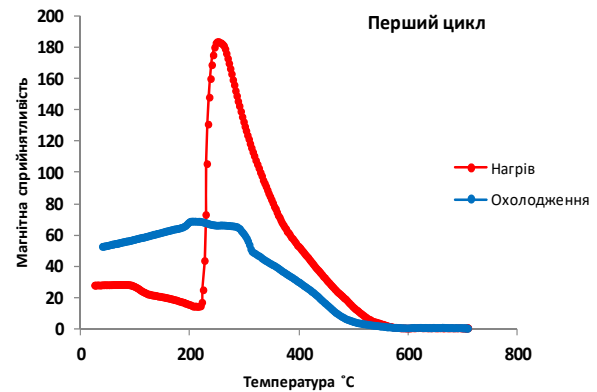


Рис. 1. Температурна залежність магнітної сприйнятливості для зразка ґрунту з горизонту А з видимими ознаками насичення вуглеводнями

На рис. 2 для цього ж зразка наведено криву визначення низькотемпературної залежності магнітної сприйнятливості. Як видно, переходи Вервея та Моріна, а також ізотропна точка магнетиту не ідентифікуються. Це підтверджує можливість домінування піротинової фази як основного магнетика території покладів вуглеводнів.

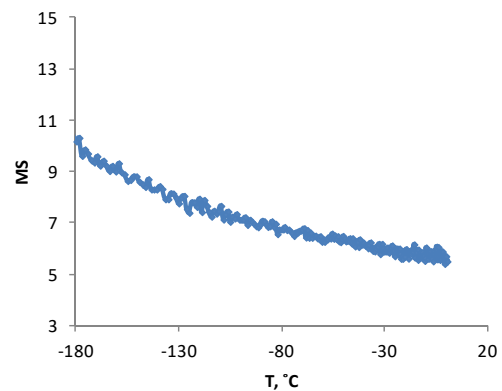


Рис. 2. Результати низькотемпературного аналізу магнітної сприйнятливості ґрунту родовища Орховичі

На рис. 3 наведено результати вивчення низькотемпературних характеристик залишкової намагніченості, отримані за допомогою магнітометричної системи Quantum Design's MPMS 3.

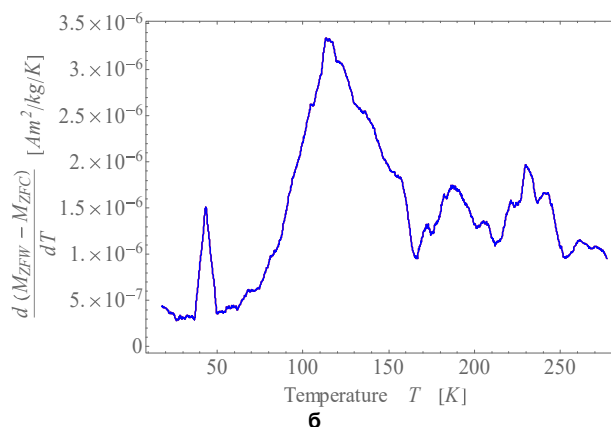
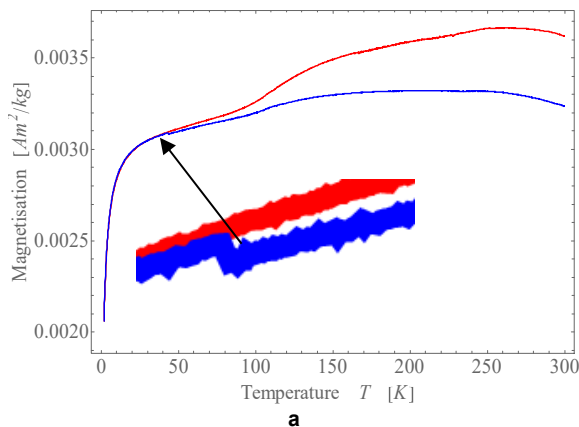


Рис. 3. Температурний аналіз залишкової намагніченості родовища Орховичі: а – криві нагріву ZFW (синя) та охолодження ZFC (червона); б – перша похідна різниці ZFC–ZFW

Дослід проводився поза впливом зовнішнього магнітного поля, а залишкову намагніченість отримано у високому магнітному полі 7 Тл за кімнатної температури. Ідентифікується абсолютний максимум на позначці у 113,5 К, що вказує на перехід Вервея для магнетиту. Водночас крутизна нахилу кривих після проходження зони Вервея та ізотропної точки магнетиту не велика. Тобто домінує дрібнозернистий магнетит в однодоменому (SD) стані природного ґрунтового генезису. Зазначена тенденція характерна для ґрунтів територій покладів вуглеводнів за умови відсутності позірних ознак насичення флюїдом. Це підтверджує зазначену нами вище тезу, що зазвичай у ґрунтового покриві одночасно перебувають магнетити педогенного та аутогенного генезису. Проте за умови збільшення роздільної здатності кривих фіксується піротинова фаза та перехід Беснуса в діапазоні температур 30–40 К.

Ґрунтовий покрив Дніпровсько-Донецької западини характеризується вищими природними значеннями магнітної сприйнятливості, а отже, у складі ґрунту наявна більша кількість магнітних мінералів, які потенційно можуть бути аутогенетично зміненими. Для розуміння

магнітної мінералогії даного об'єкта розглянемо результати термомагнітного аналізу зразків, відібраних поблизу свердловини (точка PR 28), та на ділянці, розташованій поза зоною впливу вуглеводнів (точка PR 0403) родовища Недільна. Більш детально результати магнітних вишукувань даного родовища наведено в нашій публікації (Меньшов, 2021). Для дослідження магнітних параметрів використовувався прилад Variable Field Translation Balance (VFTB). Термомагнітні аналізи залишкової намагніченості показують, що після нагрівання зразка до температури 700 °C під час охолодження відбувається незначне зменшення намагніченості зразків. Також спадання намагніченості фіксується за температури близько 580 °C, що свідчить про наявність магнетиту як основної магнітної фази (рис. 4). Залишкова намагніченість проби, яку взято біля свердловини (рис. 4а), вища, ніж для проби фонові ділянки (рис. 4б). Така поведінка IRM вказує на можливий вплив міграції флюїду на магнітні мінерали ґрунтів, а також на можливий гало-ефект. Результати геохімічних досліджень у точці PR28 зафіксували максимумами газогеохімічних параметрів.

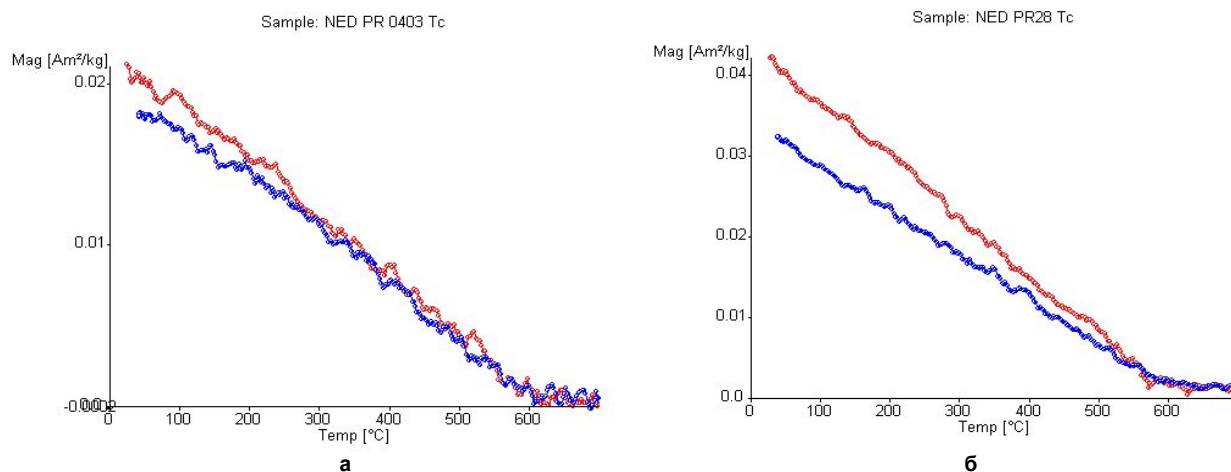


Рис. 4. Температурна залежність залишкової намагніченості: а – проба, відібрана біля свердловини; б – проба, відібрана на фоновій ділянці

З метою підвищення однозначності інтерпретації результатів термомагнітного аналізу IRM розглянемо додатково аналіз температурних змін магнітної сприйнятливості (рис. 5.)

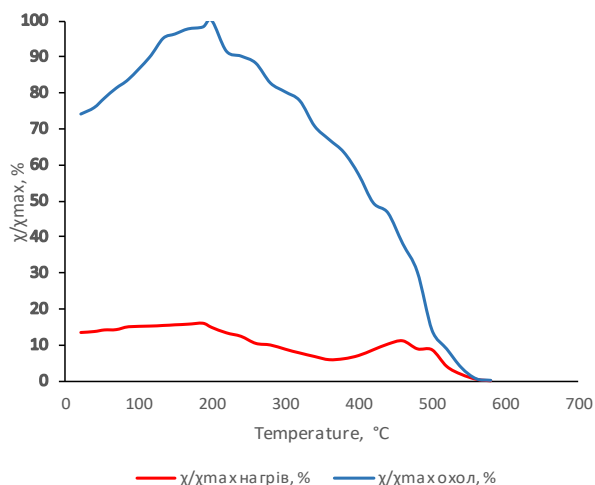


Рис. 5. Температурна залежність магнітної сприйнятливості для зразка, відібраного у межах родовища вуглеводнів поблизу свердловини, точка PR 28

Зміни магнітної сприйнятливості в діапазоні від 200 до 400 °C можуть відображати присутність сульфідів заліза або магеміту (Mathé, & Lévêque, 2005). Також така поведінка термомагнітних кривих вказує на наявність дрібнодисперсних мінералів у однодоменому стані (SD) за кімнатної температури, які переходять у суперпарамагнітний стан (SP), якщо температура зростає (Rijal et al., 2012). Пік за 500 °C найчастіше ідентифікує новоутворення магнетиту. У той же час він може бути результатом окиснення піриту та інших сульфідів вуглеводневого походження до магнетиту. Температура Кюрі близько 580 °C підтверджує наявність магнетитової фази, проте цей пік не переважає, що підтверджує припущення про генезис зміни температур у діапазоні 200–400 °C за рахунок домінування у зразку піротину або магеміту.

Аналогічний тип термомагнітних кривих при нагріванні та аналізі магнітної сприйнятливості було отримано для Рубанівського родовища Передкарпатського прогину (рис. 6).

Головною відмінністю є більш низькі абсолютні значення магнітної сприйнятливості порівняно з Недільною площею, оскільки дернові та лучні ґрунти є в кілька разів менш магнітними порівняно із чорноземами України.

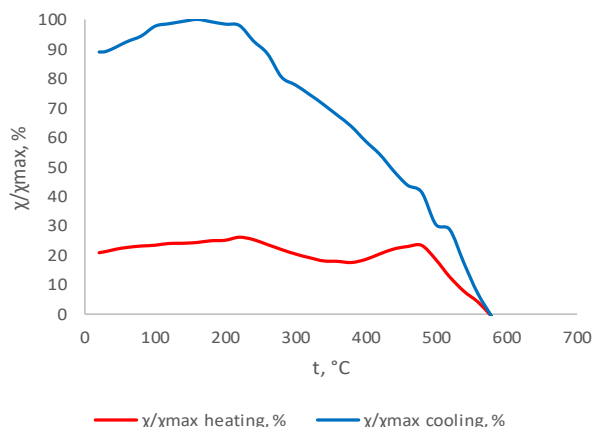


Рис. 6. Температурна залежність магнітної сприйнятливості для зразка, відібраного у межах родовища вуглеводнів поблизу свердловини Рубанівського родовища

Дискусія і висновки

Завдання ефективної та однозначної інтерпретації результатів магніто-мінералогічних аналізів не завжди є простим і вимагає комплексного залучення всієї наявної додаткової інформації. Магнітні мінерали можуть формуватися шляхом окиснення Fe^{2+} , або шляхом регенерації Fe^{3+} магнітотактичними бактеріями (Lovley et al., 1989). Магнітотактичні бактерії відновлюють Fe^{3+} . Причому вони здатні відновлювати висококристалічні мінерали Fe^{3+} , зокрема гематит, гетит і магнетит, а також погано кристалізований ферігидрит (Weber et al., 2006). Вуглеводні в осадових породах і ґрунтовому покриві, у свою чергу, впливають на окиснювачі Fe^{2+} , а також на відновники Fe^{3+} . Послідовно Fe^{2+} може окиснюватися анаеробними та аеробними Fe^{2+} магнітотактичними бактеріями, які також можуть регулювати утворення магнетиту (Kappler, & Straub, 2005). Окисно-відновні процеси й магнетотактичні бактерії та інші організми впливають на зміну феромагнетиків мінералів і в результаті змінюють магнітну сприйнятливості і намагніченість ґрунтового покриву під впливом міграції флюїду від власне покладу до верхньої частини геологічного розрізу.

Отже, магніто-мінералогічні дослідження надають важливу інформацію щодо ідентифікації магнітних фаз із врахуванням типу ґрунту. Магнітна сприйнятливості та залишкова намагніченість зразків, які відбираються біля свердловин, найчастіше характеризуються вищими значеннями порівняно з фоновими зразками. Проте фіксуються і протилежні випадки з пониженими величинами та формуванням від'ємних аномалій напруженості магнітного поля. У всіх цих випадках залишкова намагніченість та магнітна сприйнятливості вказують на прямий ефект мікропророщування, а також згадуваний гало-ефект. Одночас необхідно враховувати результати геохімічних обстежень та інші геофізичні методи і петрофізичні параметри. Варіації магнітної сприйнятливості за температур від 200 до 400 °C у зонах покладів вуглеводнів часто є ідентифікаторами присутності сульфідів заліза. У свою чергу, магнетит трапляється у всіх ґрунтах і може бути педогенного, аутогенного або детритового походження. Корисно залучати аналіз петлі гістерезису, оскільки її форма "осиної талії" ідентифікує суміш двох магнітних мінералів (наприклад, магнетиту та гематиту), а також домішки суперпарамагнітних і більших крупних зерен тих самих мінералів.

Аналіз впливу міграції вуглеводневого флюїду на зміну мінерального складу ґрунтів вказує на значущу

інформативність та перспективність впровадження методу у комплекс геологорозвідувальних робіт на різних етапах. Аутогенні зміни магнітних мінералів у верхній частині геологічного розрізу та ґрунтовому покриві, а також природне та антропогенне накопичення вуглеводневих продуктів у ґрунтах спричинює зміну магнітних властивостей та формує аномалії магнітного поля. Сформовані таким чином діагенетичні магнетити можуть підвищувати або понижувати величини магнітних параметрів ґрунтів у межах ареалів розсіювання вуглеводнів і так званої зони гало-ефекту. Магнітні аномалії ґрунтів перебувають у тісному зв'язку з аномаліями магнітного поля, геохімічними аномаліями ґрунтів та підстильних горизонтів. Ідентифікується наявність аутогенних сульфідів заліза (грейгіт, піротин), що формуються у ґрунтах під впливом вуглеводнів. Паралельно присутні ультрадисперсні оксиди заліза ґрунотвірного походження, насамперед магнетит і магеміт. Усі магнетити не перевищують псевдооднородний стан (PSD). Магнітні методи на сьогодні є носієм важливої інформації у комплексі нафтогазопрошукових робіт у межах класичних, карбонатних і нетрадиційних родовищ нафти та газу в Україні.

Список використаних джерел

- Друкаренко, В., & Орлюк, М. (2017). Про структурно-генетичний зв'язок шляхів міграції та накопичення вуглеводнів з магнітною неоднорідністю земної кори північно-західної частини Дніпровсько-Донецького авлакогену. *Вісник Київського національного університету імені Тараса Шевченка. Геологія*, 1(76), 33–41.
- Меньшов, О. (2021). Роль магнітних методів при дослідженні території ушліплених порід-колекторів нафти і газу: постановка завдання. *Вісник Київського національного університету імені Тараса Шевченка. Геологія*, 1(92), 42–49.
- Меньшов, О. (2018). Роль магнетотактичних бактерій у формуванні природного магнетизму ґрунтів України. *Вісник Київського національного університету імені Тараса Шевченка. Геологія*, 80(1), 40–45.
- Орлюк, М. І., & Друкаренко, В. В. (2018). Прогноз шляхів проходження і місць накопичення вуглеводнів Чернігівського сегмента Дніпровсько-Донецького авлакогену за геомагнітними даними. *Геофізичний журнал*, 40(2), 123–140.
- Орлюк, М. І., & Пашкевич, І. К. (2012). Глибинні джерела регіональних магнітних аномалій: тектонотипи та зв'язок із трансформними розломами. *Геофізичний журнал*, 34(4), 224–234.
- Пашкевич, І. К., Орлюк, М. І., & Лебедь, Т. В. (2014). Магнітна неоднорідність, розломна тектоніка консолідованої земної кори та нафтогазонасиченість Дніпровсько-Донецького авлакогену. *Геофізичний журнал*, 36(1), 64–80.
- Badejo, S. A., Muxworthy, A. R., Fraser, A., Stevenson, G. R., Zhao, X., & Jackson, M. (2021). Identification of magnetic enhancement at hydrocarbon-fluid contacts. *AAPG Bulletin*, 105(10), 1973–1991.
- Costanzo-Alvarez, V., Rapalini, A. E., Aldana, M., Díaz, M., Kietzmann, D., Iglesia-Llanos, M. P., ... & Walther, A. M. (2019). A combined rock-magnetic and EPR study about the effects of hydrocarbon-related diagenesis on the magnetic signature of oil shales (Vaca Muerta formation, southwestern Argentina). *Journal of Petroleum Science and Engineering*, 173, 861–879.
- De la Rosa, R., Aldana, M., Costanzo-Alvarez, V., Yezpez, S., & Amon, C. (2021). The surface expression of hydrocarbon seeps characterized by satellite image spectral analysis and rock magnetic data (Falcon basin, western Venezuela). *Journal of South American Earth Sciences*, 106, 103036.
- Donovan, D. J., Forgy, R. L., & Roberts, A. A. (1979). Aeromagnetic detection of diagenetic magnetite over oil fields. *AAPG Bull.*, 63, 245–248.
- Elmore, R. D., & Grawford, L. (1990). Remanence in authigenic magnetite: testing the hydrocarbon-magnetite hypothesis. *Journal Geophys. Res.*, 95(B), 4539–4549.
- Gadirov, V., Kalkan, E., Ozdemir, A., Palabiyik, Y., & Gadirov, K. (2022). Use of gravity and magnetic methods in oil and gas exploration: Case studies from Azerbaijan. *International Journal of Earth Sciences Knowledge and Applications*, 4(2), 143–156.
- Gadirov, V. G., Eppelbaum, L. V., Kuderavets, R. S., Menshov, O. I., & Gadirov, K. V. (2018). Indicative features of local magnetic anomalies from hydrocarbon deposits: examples from Azerbaijan and Ukraine. *Acta Geophysica*, 66, 1463–1483.
- Craig, J., & Quagliaroli, F. (2020). The oil & gas upstream cycle: Exploration activity. In EPJ Web of Conferences, Vol. 246, p. 00008. EDP Sciences.
- Goldhaber, M. B., Reynolds, R. L. (1991). Relations among hydrocarbon reservoirs, epigenetic sulfidization, and rock magnetization: examples from the South Texas Coastal Plain. *Geophysics*, 56, 748–757.
- Kappler, A., & Straub, K. L. (2005). Geomicrobiological cycling of iron. *Reviews in Mineralogy and Geochemistry*, 59(1), 85–108.
- Lovley, D. R., Baedeker, M. J., Lonergan, D. J., Cozzarelli, I. M., Phillips, E. J., & Siegel, D. I. (1989). Oxidation of aromatic contaminants coupled to microbial iron reduction. *Nature*, 339(6222), 297–300.

Lukin, A. E. (2014). Hydrocarbon potential of great depths and prospects of its mastering in Ukraine. *Geophysical Journal*, 36(4), 3–23. <https://doi.org/10.24028/gzh.0203-3100.v36i4.2014.112455>

Machel, H. G. (2001). Bacterial and thermochemical sulfate reduction in diagenetic settings – old and new insights. *Sediment. Geol.*, 14, 143–175.

Mathé, V., & Lévêque, F. (2005). Trace magnetic minerals to detect redox boundaries and drainage effects in a marshland soil in western France. *European journal of soil science*, 56(6), 737–751.

Menshov, O., Kuderavets, R., Vyzhva, S., Maksymchuk, V., Chobotok, I., & Pastushenko, T. (2016). Magnetic studies at Starunia paleontological and hydrocarbon bearing site (Carpathians, Ukraine). *Studia Geophysica et Geodaetica*, 60, 731–746.

Menshov, O., Kuderavets, R., Vyzhva, S., Chobotok, I., & Pastushenko, T. (2015). Magnetic mapping and soil magnetometry of hydrocarbon prospective areas in western Ukraine. *Studia Geophysica et Geodaetica*, 59, 614–627.

Rijal, M. L., Porsch, K., Appel, E., & Kappler, A. (2012). Magnetic signature of hydrocarbon-contaminated soils and sediments at the former oil field Hünigsen, Germany. *Studia geophysica et geodaetica*, 56, 889–908.

Sechman, H., Guzy, P., Kaszuba, P., Wojas, A., Machowski, G., Twaróg, A., & Maślanka, A. (2020). Direct and indirect surface geochemical methods in petroleum exploration: a case study from eastern part of the Polish Outer Carpathians. *International Journal of Earth Sciences*, 109, 1853–1867.

Weber, K. A., Achenbach, L. A., & Coates, J. D. (2006). Microorganisms pumping iron: anaerobic microbial iron oxidation and reduction. *Nature Reviews Microbiology*, 4(10), 752–764.

References

Badejo, S. A., Muxworthy, A. R., Fraser, A., Stevenson, G. R., Zhao, X., & Jackson, M. (2021). Identification of magnetic enhancement at hydrocarbon-fluid contacts. *AAPG Bulletin*, 105(10), 1973–1991.

Costanzo-Álvarez, V., Rapalini, A. E., Aldana, M., Díaz, M., Kietzmann, D., Iglesia-Llanos, M. P., ... & Walther, A. M. (2019). A combined rock-magnetic and EPR study about the effects of hydrocarbon-related diagenesis on the magnetic signature of oil shales (Vaca Muerta formation, southwestern Argentina). *Journal of Petroleum Science and Engineering*, 173, 861–879.

Craig, J., & Quagliaroli, F. (2020). The oil & gas upstream cycle: Exploration activity. In EPJ Web of Conferences, Vol. 246, p. 00008. EDP Sciences.

De la Rosa, R., Aldana, M., Costanzo-Álvarez, V., Yezpez, S., & Amon, C. (2021). The surface expression of hydrocarbon seeps characterized by satellite image spectral analysis and rock magnetic data (Falcon basin, western Venezuela). *Journal of South American Earth Sciences*, 106, 103036.

Donavan, T. J., Forgey, R. L., & Roberts, A. A. (1979). Aeromagnetic detection of diagenetic magnetite over oil fields. *AAPG Bull.*, 63, 245–248.

Drukarenko, V., & Orlyuk, M. (2017). Structural genetic relation of migration paths and hydrocarbons accumulation with Earth crust magnetic heterogeneity of north-western part of the Dnieper-Donets aulakogen. *Visnyk of Taras Shevchenko National University of Kyiv. Geology*, 1(76), 33–41 [in Ukrainian].

Elmore, R. D., & Grawford, L. (1990). Remanence in authigenic magnetite: testing the hydrocarbon-magnetite hypothesis. *Journal Geophys. Res.*, 95(B), 4539–4549.

Gadirov, V., Kalkan, E., Ozdemir, A., Palabiyik, Y., & Gadirov, K. (2022). Use of gravity and magnetic methods in oil and gas exploration: Case studies from Azerbaijan. *International Journal of Earth Sciences Knowledge and Applications*, 4(2), 143–156.

Gadirov, V. G., Eppelbaum, L. V., Kuderavets, R. S., Menshov, O. I., & Gadirov, K. V. (2018). Indicative features of local magnetic anomalies from hydrocarbon deposits: examples from Azerbaijan and Ukraine. *Acta Geophysica*, 66, 1463–1483.

Goldhaber, M. B., & Reynolds, R. L. (1991). Relations among hydrocarbon reservoirs, epigenetic sulfidization, and rock magnetization: examples from the South Texas Coastal Plain. *Geophysics*, 56, 748–757.

Kappler, A., & Straub, K. L. (2005). Geomicrobiological cycling of iron. *Reviews in Mineralogy and Geochemistry*, 59(1), 85–108.

Lovley, D. R., Baedeker, M. J., Lonergan, D. J., Cozzarelli, I. M., Phillips, E. J., & Siegel, D. I. (1989). Oxidation of aromatic contaminants coupled to microbial iron reduction. *Nature*, 339(6222), 297–300.

Lukin, A. E. (2014). Hydrocarbon potential of great depths and prospects of its mastering in Ukraine. *Geophysical Journal*, 36(4), 3–23. <https://doi.org/10.24028/gzh.0203-3100.v36i4.2014.112455>

Machel, H. G. (2001). Bacterial and thermochemical sulfate reduction in diagenetic settings – old and new insights. *Sediment. Geol.*, 14, 143–175.

Mathé, V., & Lévêque, F. (2005). Trace magnetic minerals to detect redox boundaries and drainage effects in a marshland soil in western France. *European journal of soil science*, 56(6), 737–751.

Menshov, O. (2018). The role of magnetotactic bacteria in formation of natural magnetism of Ukraine soils. *Visnyk of Taras Shevchenko National University of Kyiv. Geology*, 80(1), 40–45 [in Ukrainian].

Menshov, O. (2021). The role of magnetic methods in the study of areas of the tight oil and gas: introduction. *Visnyk of Taras Shevchenko National University of Kyiv. Geology*, 1(92), 42–49 [in Ukrainian].

Menshov, O., Kuderavets, R., Vyzhva, S., Chobotok, I., & Pastushenko, T. (2015). Magnetic mapping and soil magnetometry of hydrocarbon prospective areas in western Ukraine. *Studia Geophysica et Geodaetica*, 59, 614–627.

Menshov, O., Kuderavets, R., Vyzhva, S., Maksymchuk, V., Chobotok, I., & Pastushenko, T. (2016). Magnetic studies at Starunia paleontological and hydrocarbon bearing site (Carpathians, Ukraine). *Studia Geophysica et Geodaetica*, 60, 731–746.

Orlyuk, M. I., & Drukarenko, V. V. (2018). Prediction of pathways and places of accumulation for hydrocarbons of the Chernigiv segment of the Dnieper-Donets aulakogen in relation to magnetic heterogeneity. *Geophysical Journal*, 40(2), 123–140 [in Ukrainian].

Orlyuk, M. I., & Pashkevich, I. K. (2012). Deep sources of regional magnetic anomalies: tectonotypes and relation with transcrustal faults. *Geophysical Journal*, 34(4), 224–234 [in Russian].

Pashkevich, I. K., Orlyuk, M. I., & Lebed', T. V. (2014). Magnetic data, fault tectonics of consolidated earth crust and oil-and-gas content of the Dnieper-Donets aulakogen. *Geophysical Journal*, 36(1), 64–80 [in Russian].

Rijal, M. L., Porsch, K., Appel, E., & Kappler, A. (2012). Magnetic signature of hydrocarbon-contaminated soils and sediments at the former oil field Hünigsen, Germany. *Studia geophysica et geodaetica*, 56, 889–908.

Sechman, H., Guzy, P., Kaszuba, P., Wojas, A., Machowski, G., Twaróg, A., & Maślanka, A. (2020). Direct and indirect surface geochemical methods in petroleum exploration: a case study from eastern part of the Polish Outer Carpathians. *International Journal of Earth Sciences*, 109, 1853–1867.

Weber, K. A., Achenbach, L. A., & Coates, J. D. (2006). Microorganisms pumping iron: anaerobic microbial iron oxidation and reduction. *Nature Reviews Microbiology*, 4(10), 752–764.

Отримано редакцією журналу / Received: 04.08.23

Прорецензовано / Revised: 28.08.23

Схвалено до друку / Accepted: 21.02.24

Oleksandr MENSHOV, DSc (Geol.), Senior Researcher

ORCID ID: 0000-0001-7280-8453

e-mail: menshov@knu.ua

Taras Shevchenko National University of Kyiv, Kyiv, Ukraine

FLUIDS MIGRATION IMPACT ON SOIL MAGNETIC MINERALOGY

Background. The war in Ukraine arises the urgent need to intensify hydrocarbon production on its own territory in order to maintain and develop the country's energy independence. The effectiveness, low cost and relevance of the involvement are demonstrated by magnetic methods of studies of the near surface geological section and the soil for the oil and gas prospecting.

Methods. The methodology of magnetic studies for the hydrocarbon prospecting is based on the methods of studying the environmental magnetism and soil, precision magnetic survey of natural systems and authigenic models of changes in magnetic mineralogy under the influence of hydrocarbon fluid migration.

Results. The crucial aim is to distinguish the sources of the formation of the magnetic minerals. In most cases, soils contain minerals of natural pedogenic origin, authigenic secondary magnetic minerals, and sometimes detrital fine-coarse magnetic phases. For Ukraine, magnetite, maghemite, hematite, and goethite are the most common magnetic minerals of soils of the pedogenic origin. At the same time, the experience of conducting magnetic mineralogical analyzes of soils in the territories of oil and gas deposits indicates the presence of iron sulfides. First of all, monoclinic pyrrhotite is identified. The soils also contain accompanying hexagonal pyrrhotite, pyrite, and greigite. The results of thermomagnetic analyzes and hysteresis loops of soil samples collected at the territories of hydrocarbon deposits are presented and their mineral composition is analyzed.

Conclusions. The results of the study of the impact of hydrocarbon fluid migration (microseepage) on the change in the mineral composition of soils indicate significant informativeness and the perspective of introducing the method into the complex of geological exploration works at various stages. Authigenic changes of magnetic minerals in the near surface geological section and soil, as well as natural and anthropogenic accumulation of hydrocarbon products in soils, cause changes in magnetic properties and form magnetic field anomalies.

Keywords: soil, magnetic minerals, magnetic susceptibility, fluids, hydrocarbons.

Автор заявляє про відсутність конфлікту інтересів. Спонсори не брали участі в розробленні дослідження; у зборі, аналізі чи інтерпретації даних; у написанні рукопису; в рішенні про публікацію результатів.

The author declares no conflicts of interest. The funders had no role in the design of the study; in the collection, analyses or interpretation of data; in the writing of the manuscript; in the decision to publish the results.