

УДК 550.83–1029.12

© **О.І. Меньшов, А.В. Сухорада, 2011**

*Київський національний університет імені Тараса Шевченка,  
м. Київ*

## **ГЕОЛОГІЧНА ІНФОРМАТИВНІСТЬ МАГНІТНИХ ДОСЛІДЖЕНЬ ПРИ ПОШУКАХ ВУГЛЕВОДНІВ. СТАН ПРОБЛЕМИ**

Розглянуто питання про можливість залучення магнітних методів для вирішення завдань пошуків вуглеводнів. Узагальнено результати досліджень проблеми у світі. Наведено приклади магнітних досліджень гірських порід і ґрунтів на територіях покладів вуглеводнів.

**Ключові слова:** магнетизм, ґрунти, вуглеводні, прямі пошуки нафти та газу.

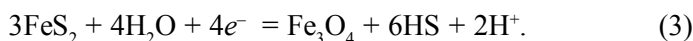
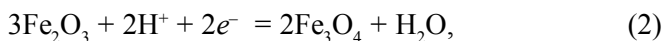
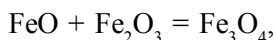
**Вступ.** У контексті одного з основних завдань геологічної галузі України – пошуків нафти і газу, актуальною вбачається перспектива використання магнітометричних та магнітних методів для пошуків вуглеводнів [1, 2]. Останнім часом ефективність сейсмічних досліджень структурних і неструктурних пасток дещо знижується. При цьому сейсморозвідка не завжди надає повну інформацію про нафтогазоносні інтервали розрізу. Тому на ранніх етапах пошуків нафти і газу дослідники намагаються використовувати прямі методи пошуків вуглеводнів – геохімічні, великанної поляризації та ін. Зауважимо, що значущих результатів у такому контексті досягнуто за допомогою використання геоелектричних методів саме вітчизняними фахівцями (М.А. Якимчук, С.П. Левашов, І.М. Корчагін [3, 4]). Повертаючись до використання магнітометрії під час пошуків нафти і газу, відзначимо, що в основі використання вказаного методу лежить гіпотеза про міграцію вуглеводнів (мікропросочування) [5]. Вона підтверджується сейсмічними, радіоактивними, геохімічними методами. При цьому аномалії магнітної сприйнятливості та інших магнітних параметрів формуються як у нижчезалягаючих породах, так і у ґрунтовому покриві за рахунок формування (або привнесення) магнітних мінералів. Отже, саме магнітні параметри важливі для геофізичних досліджень міграції вуглеводнів над їх покладами.

На етапі магнітних досліджень накопичується досвід того, що поклади нафти і газу можуть бути знайдені з використанням магнітометрії

у комбінації з високороздільними рок-магнітними та педомагнітними дослідженнями мінералогії порід і ґрунтів, а також вивченням природи міграції вуглеводнів. Важливою є необхідність зрозуміти механізм новоутворення магнітних мінералів у процесі міграції вуглеводнів. Існує декілька моделей таких процесів. Одна з моделей [6] утворення вторинного магнетиту в процесі міграції вуглеводнів ґрунтується на заміщенні  $\text{Fe}^{3+}$  з гематиту на  $\text{Fe}^{2+}$ . В основі іншої моделі [7] лежить теорія магнітних сульфідів за припущення, що заміщення піриту відіграє важливу роль. При цьому природним джерелом магнітних аномалій стає новоутворений піротин. У подібних процесах істотне значення мають мікробіологічні та термохімічні процеси [8]. Ще одна модель формування підвищеного магнетизму нафтогазовмісних осадових порід і ґрунтів базується на залученні у такі процеси сидериту (Elmore [9]).

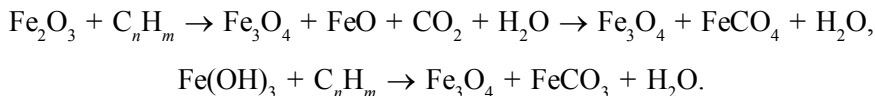
**Теоретичні основи, матеріали, методи.** Міграція вуглеводнів залежить від таких факторів, як температура, тиск, рН, Eh, активність двовалентного заліза, характеристика залізистих мінералів, гідродинамічні умови, активність мікроорганізмів, сірки та бікарбонатів.

Заміщення магнетиту включає три основні типи хімічних реакцій [10]:



За домінування в природних умовах у гірській породі або ґрунтового покриві залізистого мінералу магеміту формування вторинного магнетиту відбувається за реакціями (1). Якщо вихідним мінералом є домінуючий пірит, тоді відбувається реакція (3). У цих реакціях слабомагнітні залізисті мінерали гематит та пірит заміщуються вторинним магнетитом, який підвищує рок-магнітні та педомагнітні величини. Зауважимо, що пірит може бути залучений і до реакцій, в результаті яких формується інший сильно магнітний мінерал – піротин. Крім того, феримагнітний грейгіт ( $\text{Fe}_3\text{S}_4$ ) є важливим продуктом перетворення сірки, спричиненого міграцією вуглеводнів. Такі ситуації відомі на родовищі нафти Сімпсон у США. Природна залишкова намагніченість покладів грейгітвмісних порід зумовлює локальні магнітні аномалії. Водночас основним продуктом

перетворення вуглецю може бути вторинний сидерит, який часто трапляється у карбонатних резервуарах [11]. При цьому основними хімічними реакціями стають



Відзначимо, що основну роль у формуванні магнітних аномалій над покладами нафти та газу відіграє процес міграції вуглеводнів. За наявності цих речовин залізовмісні мінерали переходять із слабomagнітних форм у сильномагнітні вторинні мінерали, причому як у нижчезалігаючих геологічних горизонтах ареалу покладу, так і на земній поверхні, у ґрунтовому покриві.

Крім того, для пояснення магнітних аномалій у приповерхневих шарах (ґрунтовий покрив, леси, палеопедосфера, підстилаючі породи) на територіях покладів вуглеводнів залучають термодинамічну теорію дифузії газів, припускаючи замкнутість системи. Молекули вуглеводнів проникають через вищезалігаючі пласти до поверхневих шарів. Зазначену теорію розглянуто на прикладі Західного Китаю, інформацію підтверджено бурінням відповідних свердловин [12].

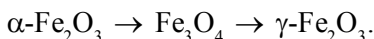
У лесах відбувається біодеградація вуглеводнів, в результаті чого з'являється аутогенний магнетит. Також йде процес окиснення в присутності мікроорганізмів і зменшення кількості сульфатів у сирій нафті, що продукує аутогенний піротин ( $\text{FeS}_{1+x}$ ), анаеробний вплив на вуглеводні, включаючи реакцію з  $\text{Fe}_2\text{O}_3$  у лесах, унаслідок чого формуються магнетит і піротин:  $2\text{H}^+ + \text{CH}_4 + \text{SO}_4^{2-} \rightarrow \text{H}_2\text{S} + \text{CO}_2 + 2\text{H}_2\text{O}$ ;  $\text{H}_2\text{S}$  знижує  $\text{Fe}_2\text{O}_3$  частково до  $\text{FeO}$  та  $\text{FeS}_{1+x}$ :



Магнітна сприйнятливість  $\text{FeS}_{1+x}$  вища за магнітну сприйнятливість  $\text{Fe}_2\text{O}_3$ .  $\text{Fe}_2\text{O}_3$  та  $\text{FeO}$  рівномірно формують магнетит:



Важливою є трансформація феромагнітного матеріалу за наявності вуглеводнів. За результатами експериментальних досліджень, із зростанням густини вуглеводнів за наявності потоку кисню та високих температур (270–340 °C) проходить реакція



Згідно з теорією феромагнетизму, для зміни магнітної сприйнятливості будь-якого магнітного домену достатньо зміни навколишньої температури. Зміни підпорядковуються закону Кюрі–Вейса. Звідси за досягнення висхідним флюїдним потоком вуглеводнів лесових шарів підвищується їхня магнітна сприйнятливість.

Для аналізу магнітних досліджень гірських порід і ґрунтів на території, перспективних на поклади вуглеводнів, ми використовували такі магнітні параметри: питому магнітну сприйнятливість  $\chi$ ; відношення  $k/J_{rs}$ ,  $J_{rs}/J_s$  ( $k$  – об’ємна магнітна сприйнятливість,  $J_{rs}$  – залишкова намагніченість насичення (ізотермальна),  $J_s$  – намагніченість насичення) – аналогі параметрів  $\alpha$  і  $\beta$ , які використовуються українськими фахівцями рокмагнетизму; відношення  $S = \text{IRM}_{-0,3T} / \text{IRM}_{+2T}$ , де ізотермальна залишкова намагніченість вимірюється за різних значень зовнішнього магнітного поля;  $H_c$  – коерцетивна сила. Для вивчення магнітної мінералогії застосовують поняття магнітних фаз. Магнетики можуть бути в одній із магнітних фаз: SP – суперпарамагнітна, SD – однодоменна, PSD – псевдооднодоменна, MD – багатодоменна.

**Результати та їх обговорення.** Розглянемо декілька прикладів практичного застосування магнітних і магнітометричних методів дослідження ґрунтового покриття та нижчезалягаючих порід на територіях, перспективних на поклади вуглеводнів.

У першому прикладі проаналізуємо результати дослідження магнітних параметрів зразків, які відібрані із свердловин продуктивної (св. М36) та сухої (св. М46), що розташовані на території нафтоносної провінції Мавангмао у Китаї [5]. Із св. М36 зразки відбирали в інтервалі глибин 4,6–1433,5 м (інтервал 1349–1414 м характеризується як продуктивний), із св. М46 (суха) – в інтервалах 5,7–1506 і 1617 м. Разом з магнітними вимірюваннями була залучена мікроскопія для визначення важких металів і відповідних мінералів. На рис. 1 відзначаються помітні аномалії у продуктивному інтервалі св. М36.

Кореляція відношень  $k/J_{rs}$  та  $J_{rs}/J_s$  відсутня для зразків із св. М46 і непродуктивних горизонтів св. М36 (рис. 2). Водночас зразки із продуктивних горизонтів корелюються позитивно.

За даними мінералогічного аналізу більшість залізистих мінералів у зразках з обох свердловин представлені магемітом, сидеритом, піритом, меншою мірою – гематитом, ільменітом, піритом. Вміст магеміту вищий у зразках із св. М36, особливо з нафтопродуктивних горизонтів, по-

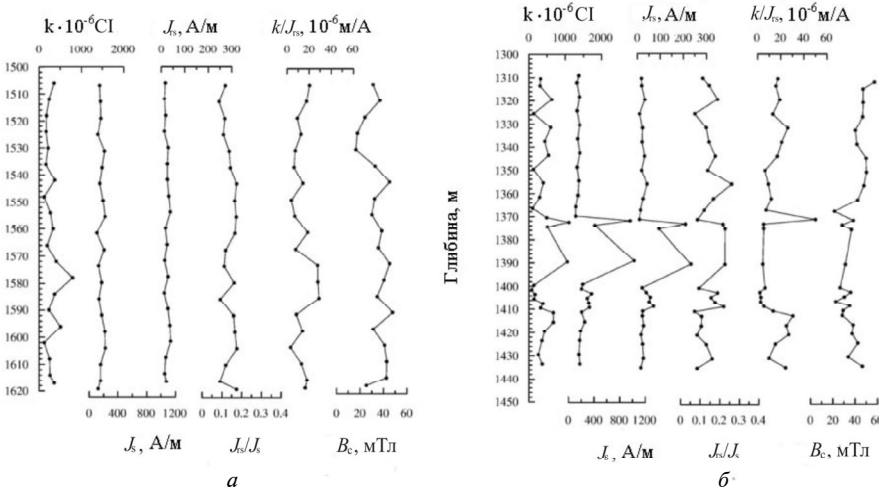
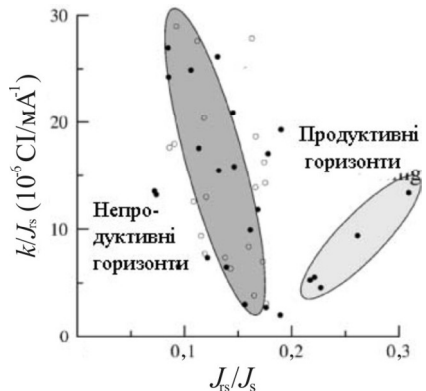


Рис. 1. Змінення з глибиною магнітних параметрів у сухій св. М46 (а) і продуктивній св. М36 (б) [5]

рівняно зі зразками із св. М46. Вміст сидериту та піриту дещо вищий у зразках із св. М46.

Територія розташування обох свердловин характеризується подібною літологією. При цьому магнетизм зразків із св. М46 дещо нижчий, ніж із зразків св. М36 і має доволі однорідний характер, натомість для зразків із св. М36 він вищий, особливо це помітно у продуктивних горизонтах. Останнє може свідчити про вплив вуглеводнів на формування магнітного сигналу в околі св. М36. Важливим чинником для розуміння природи магнітних носіїв у продуктивній св. М36 є те, що вміст сидериту в ній значно нижчий, ніж у св. М46. Це вказує на можливе заміщення сидериту магнетитом за наявності вуглеводнів. Такий висновок підтверджується інформацією, що сидерит не може

Рис. 2. Кореляційні залежності між  $k/J_{rs}$  до  $J_{rs}/J_s$ . Чорні точки – зразки із продуктивної св. М36, білі – зразки із сухої св. М46. Світлим овалом виділено зразки із аномальними розмірами зерен із нафтопродуктивних горизонтів, темний овал – характерні для інших прошарків зерна [5]



мати техногенного походження в межах згаданої території, а отже, діє лише вуглеводневий чинник.

Аналіз відношень  $k/J_{rs}$  до  $J_{rs}/J_{s^2}$  за якими можна зрозуміти, у якій фазі перебувають магнітні мінерали для їх ідентифікації та виявлення їх походження, дав змогу зробити одне із основних припущень наведеного прикладу: аутогенний магеміт із нафтоносних прошарків св. М36 сформувався внаслідок заміщення сидериту під час комплексних геохімічних процесів.

Розглянемо інший приклад [13]. Досліджено магнітну сприйнятливість, проведено термомагнітний аналіз, розраховано відношення  $S = IRM_{-0,3T} / IRM_{+2T}$  для колекції зразків ґрунтів з перспективної на поклади вуглеводнів площі, яка знаходиться у південній частині Венесуели (Venezuelan Andean Range). Розраховано концентрацію вільних радикалів органічного походження у зразках за допомогою електронного парамагнітного резонансу. Основною магнітною фазою для більшості зразків визначено магнетит. Магнітні параметри зіставлені з даними карти розподілу етану на дослідній ділянці.

Результати вивчення частотної залежності магнітної сприйнятливості колекції зразків показали, що відповідна залежність фактично відсутня. Більшість зразків характеризуються високими значеннями частотно-залежної магнітної сприйнятливості за відношення  $S$  близького до одиниці. Це засвідчує наявність магнітного мінералу, для якого характерні висока магнітна сприйнятливість і низька коерцетивність ( $< 0,3T$ ). Таким мінералом може бути магнетит.

Вивчення температурної залежності зразків ґрунтів з території перспективної на поклади нафти та газу, дало змогу дійти висновку щодо суттєвого падіння магнітності за температури, близькі до  $580^\circ\text{C}$ , що відповідає наявності магнетитової фази у зразках (рис. 3).

На рис. 4 показано змінення концентрації етану, магнітної сприйнятливості зразків ґрунту та концентрації вільних радикалів органічного походження вздовж профілю, що прокладений з півночі на південь у межах дослідної ділянки. Частина графіків, де зафіксовано підвищення усіх показників (територія Cretaceous Kitchen), відповідає зоні з неглибоко залягаючими продуктивними горизонтами, що розкриті свердловинами. При цьому термохімічні кондиції сприятливі для утворення осадового аутогенного магнетиту.

Таким чином, ділянки із підвищеними значеннями магнітної сприйнятливості та близькими до одиниці значеннями відношення  $S$  часто відпо-

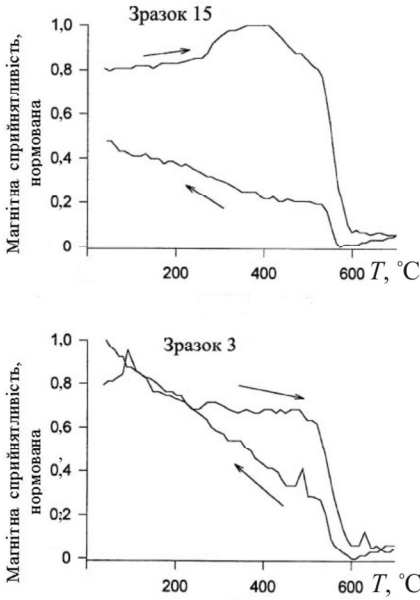


Рис. 3. Нормовані криві температурної залежності магнітної сприйнятливості (нагрівання та охолодження) для двох репрезентативних ділянок [13]

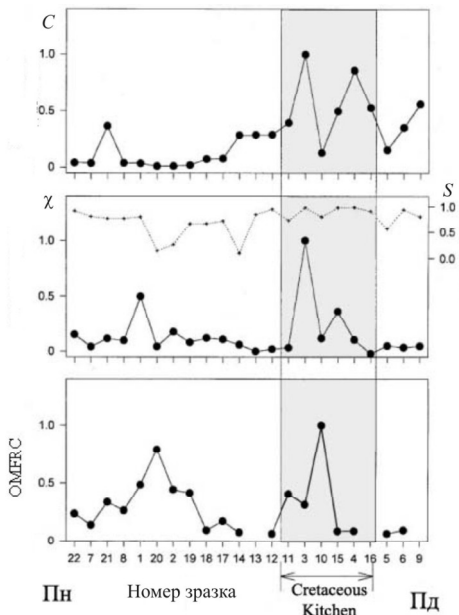


Рис. 4. Нормовані графіки вздовж профілю Пн–Пд:  $C$  – концентрація етану, нормована;  $\chi$  – магнітна сприйнятливість, нормована; параметр  $S$  – OMERC – концентрація вільних радикалів органічного походження. Затемнена частина – точки із найбільшою концентрацією етану (територія Cretaceous Kitchen) [13]

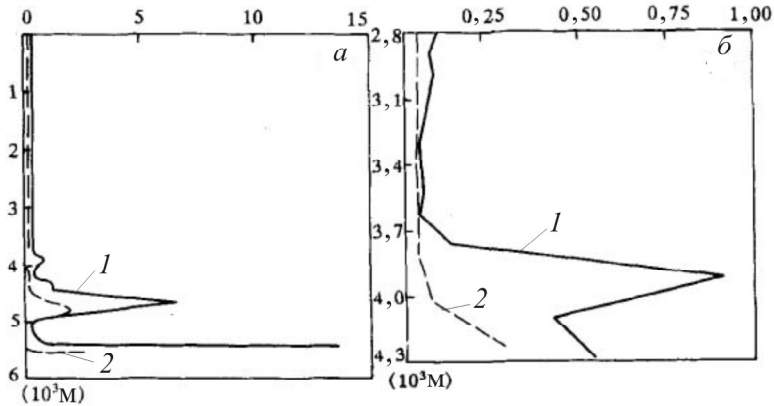


Рис. 5. Вертикальні профілі об'ємної магнітної сприйнятливості ( $k \cdot 10^{-3}$  од. СІ) св. С7 (1) та С6 (2) [14]

відають збільшенню вмісту органічних речовин у зразках ґрунтів, де формується вторинний магнетит. Зазначена ситуація може засвідчувати вертикальну міграцію вуглеводнів. У свою чергу, цей підхід може бути покладений у основу теорії використання магнітного та магнітометричного методів для пошуків вуглеводнів.

Розглянемо дві свердловини, які пробурені на ключовій території для нафтогазодобувної галузі Китаю [14]. Свердловини характеризуються подібними стратиграфічними, літологічними, структурними показниками. Спостерігаються відмінності у магнітних властивостях подібних літологічних горизонтів. Зокрема, у св. С7 вміст оксидів заліза (магнетит, магеміт, гематит) часто вищий у продуктивних горизонтах, ніж у св. С6 у подібних непродуктивних горизонтах. На рис. 5 видно, що загалом об'ємна магнітна сприйнятливість відповідних горизонтів і глибин для свердловини С7 вища. При цьому найбільш це очевидно для продуктивних горизонтів (інтервали 400–600 і 3700–4300 м). Крім того, продуктивні горизонти обох свердловин характеризуються хоча і різною за величиною, але подібною за характером зміни з глибиною кривою магнітної сприйнятливості.

За даними рис. 6 можна проінтерпретувати наявність сферичних зерен магнетиту у зразках із св. С7. За допомогою електронного мікроскопа визначено три типи мікротекstur поверхонь сферичного магнетиту: *a, b* – міжкристалічні структури порового простору; *c, d* – округлі текстури (притаманні космічному пилу); *e, f* – агрегати ультрадисперс-



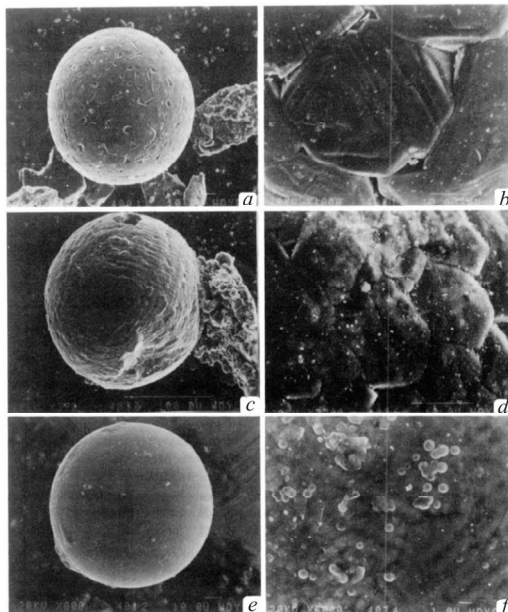


Рис. 6. Результати сканування електронним мікроскопом сферичних магнітних зерен із св. С7. Ліва та права частини – магнітний матеріал із різним збільшенням: *a, b* – міжкристалічні структури порового простору; *c, d* – округлі текстури; *e, f* – агрегати ультрадисперсних зерен [14]

них зерен з діаметром менше 1 мкм. Останні подібні до знайдених таких зерен у покладах газового басейну Ордос Басейн, Китай та покладах нафти у пісковиках поблизу Денвера, США. Виявлено, що у відповідних зразках супутніх сполук магнітні сферули ультрадисперсних зерен (ultrafine grains), що представлені аутогенним магнетитом, асоціюються із міграцією вуглеводнів у низькотемпературних умовах.

Отже, існує суттєва різниця між магнітними властивостями порід із продуктивної св. С7 та пошукової св. С6. При цьому магнетизм нафтовмісних горизонтів св. С7 вищий. Це є індикатором того, що геохімічні процеси, зумовлені міграцією вуглеводневої речовини, генерують інтенсивні магнітні прошарки вище покладів вуглеводнів. Порооди, які розкриті свердловинами, містять вторинний магнетит і сидерит, залежно від ступеня міграції вуглеводнів. Це слабкоерцетивні фази ( $H_c < 20$  мТл). Магнітні та мінералогічні властивості ґрунтового покриву над продуктивною св. С7 засвідчують, що вторинні магнітні мінерали, які асоцію-

ються із міграцією вуглеводнів, можуть досягати земної поверхні. Вторинний магнетит і сидерит формуються у ґрунтах унаслідок заміщення заліза у гідроксидах заліза за низькотемпературних умов. Сферичний магнетит, що складається із ультрадисперсних часточок, найімовірніше, є аутогенним і формується під час низькотемпературних процесів у межах вуглеводневих ареалів. Цей висновок є суттєвим і актуальним для створення оптимальної технології прямих пошуків покладів вуглеводнів.

**Висновки.** Існує позитивна кореляція між підвищенням концентрації магнетиків у гірських породах і ґрунтовому покриві та вуглеводневим ефектом. Вторинні магнітні мінерали, які формуються в процесі міграції вуглеводнів, можуть створювати магнітні аномалії як у нижчезалегаючих горизонтах, які розкриваються відповідними свердловинами, так і у ґрунтах, поширених у межах вуглеводневих ареалів. Відповідні магнетики утворюються в процесі окиснення первинних залізистих мінералів. Зокрема, аутогенні магеміт і магнетит з нафтоносних прошарків можуть формуватися в результаті заміщення сидериту під час комплексних геохімічних процесів. Такий висновок підтверджується інформацією, що у розглянутих вище прикладах сидерит не може бути техногенного походження, а отже, діє лише вуглеводневий фактор.

Іншим вторинним магнітним мінералом може бути піротин, як продукт взаємодії вуглеводнів з піритом. Крім того, зафіксовано (наприклад, родовище нафти Сімпсон у США) створення феримагнітним грейгітом локальних магнітних аномалій внаслідок високої природної залишкової намагніченості грейгітвмісних гірських порід.

Виявлення ділянок з підвищеними магнітними властивостями та концентрацією тонкозернистих часточок у гірських породах і ґрунтовому покриві може стати важливим інструментом під час пошуків нафти і газу. Комплексуючи магнітні та магнітометричні дані із іншими пошуковими методами, можна отримати додаткову істотну, дешеву та експресну інформацію. Важливим є створення чіткої теоретичної бази використання наведеної інформації для пошуків вуглеводнів.

1. *Меньшов О.І., Сухорада А.В., Буковський В.П.* До питання про використання методів магнітометрії при вивченні властивостей покладів вуглеводнів // Теоретичні та прикладні аспекти геоінформатики. – К, 2008. – С. 33–38.
2. *Меньшов О.І., Сухорада А.В., Буковський В.П.* Педомагнетизм нафтогазоперспективних територій (на прикладі ДДЗ) // Теоретичні та прикладні аспекти геоінформатики. – К, 2009. – С. 163–170.

3. *Левашов С.П., Якимчук Н.А., Корчагин И.Н., Таскинбаев К.М.* Технология прямых поисков залежей углеводородов геоэлектрическими методами и результаты ее применения на нефтегазовых месторождениях Западного Казахстана // *Геоинформатика*. – 2002. – № 3. – С. 15–25.
4. *Левашов С.П., Якимчук Н.А., Корчагин И.Н. и др.* О возможности картирования геоэлектрическими методами скоплений углеводородов в кристаллических породах // *Там же*. – 2010. – № 1. – С. 22–32.
5. *Liu Q., Liu Q., Chan L. et al.* Magnetic enhancement caused by hydrocarbon migration in the Mawangmiao Oil Field., Jiangnan Basin China // *J. Petroleum Sci. and Engineering*. – 2006. – **53**. – P. 25–33.
6. *Donavan T. J., Forgey R. L., Roberts A. A.* Aeromagnetic detection of diagenetic magnetite over oil fields // *AAPG Bull.* – 1979. – **63**. – P. 245–248.
7. *Goldhaber M.B., Reynolds R.L.* Relations among hydrocarbon reservoirs, epigenetic sulfidization, and rock magnetization: examples from the South Texas Coastal Plain // *Geophysics*. – 1991. – **56**. – P. 748–757.
8. *Machel H.G.* Bacterial and thermochemical sulfate reduction in diagenetic settings – old and new insights // *Sediment. Geol.* – 2001. – **14**. – P. 143–175.
9. *Elmore R.D., Grawford L.* Remanence in authigenic magnetite: testing the hydrocarbon – magnetite hypothesis // *J. Geophys. Res.* – 1990. – **95** (B). – P. 4539–4549.
10. *Liu Q., Cheng T., Liu S.* Comprehensive evaluation of mechanism of “chimney effect” using principles of magnetism, geochemistry and mineralogy // *Chinese Sci. Bull.* – 1998. – **43**, № 9. – P. 743–748.
11. *Yeremin V.N., Molosovskiy E.A., Pervushova Y.V et al.* Magnetic zonation of sedimentary rocks and the spatial distribution of authigenic iron minerals in hydrocarbon halo // *Int. Geol. Review*. – 1986. – **28**. – P. 734.
12. *Liu Q., Liu S., Qu Z. et al.* Magnetic and mineralogical characteristics of hydrocarbon microseepage above oil/gas reservoirs of Tuoku region, northern Tarim Basin, China // *Science in China. Ser. D*. – 1998. – **41**, N. 2. – P. 121–129.
13. *Gonzalez F., Aldana M., Constanzo-Alvarez V., Diaz M., Romero I.* An integrated rock magnetic and EPR study in soil samples from a hydrocarbon prospective area // *Physics and Chemistry of the Earth*. – 2002. – **27**. – P. 1311–1317.
14. *Shao G., Liang Z., Wang Z. et al.* Surface Loess Susceptibility Anomalies Directly Indicating Oil and Gas Reservoirs // *Appl. Geophysics*. – 2005. – **1–2**, N. 4. – P. 197–203.

**Геологическая информативность магнитных исследований при поисках углеводородов. Состояние проблемы** А.И. Меньшов, А.В. Сухорада

**РЕЗЮМЕ.** Рассмотрены вопросы о возможности привлечения магнитных методов для решения задач поисков углеводородов. Обобщены результаты исследований в мире. Приведены примеры магнитных исследований горных пород и почв на территориях залежей углеводородов.

**Ключевые слова:** магнетизм, почвы, углеводороды, прямые поиски нефти и газа.

**Geological informative of the magnetic investigations at the hydrocarbon prospecting. State of the problem** O.I. Menshov, A.V. Sukhorada

**SUMMARY.** The questions about the possibility of attracting magnetic methods for hydrocarbon prospecting are considered. The results of the investigations all over the world are generalized. The examples of the magnetic investigations of rocks and soils at the territories of hydrocarbon deposits are presented.

**Keywords:** magnetism, soils, hydrocarbons, direct oil and gas prospecting.