

УДК 550.382.3

О. Меньшов, д-р геол. наук, ст. наук. співроб.
E-mail: menshov.o@ukr.net
Київський національний університет імені Тараса Шевченка
ННІ "Інститут Геології", вул. Васильківська, 90, Київ, 03022, Україна

РОЛЬ МАГНЕТОТАКТИЧНИХ БАКТЕРІЙ У ФОРМУВАННІ ПРИРОДНОГО МАГНЕТИЗМУ ҐРУНТІВ УКРАЇНИ

(Рекомендовано членом редакційної колегії д-ром фіз.-мат. наук, проф. П.О. Міненком)

Дослідження ролі магнетотактичних бактерій у формуванні магнетизму ґрунтів є важливим у контексті вивчення незабруднених та незмінених фонових ґрунтових покривів. Моєа йде про генезис магнітних властивостей, розвиток носіїв магнетизму у процесі ґрунтоутворення, застосування магнітних методів для визначення стану ґрунтів, їх ерозії, впливу пожеж, деградації, деструкції, водних режимів, ущільнення, продуктивності, родючості, визначення вмісту гумусу, фізико-хімічних параметрів, які використовуються в агрономії та ґрунтознавстві. Магнетотактичні бактерії зустрічаються у ґрунтах багатих на залізо. Магнітосоми чистих стабільних однодомних зерен (SD) виробляються внутрішньоклітинно і ідентифікуються у магнітних екстрактах ґрунтів за допомогою просвічуючого електронного мікроскопа. У природних незмінених ґрунтах можуть одночасно виявлятися стабільні однодомні зерна – магнітосоми бактеріального походження, а також суперпарамагнітні зерна (SP) неорганічного походження. Магнетотактичні бактерії формують магнітні властивості природних ґрунтових покривів поза значущим впливом літогенної основи, за відсутності прямого впливу вуглеводнів та техногенного забруднення. У статті наведено розподіли магнітної сприйнятливості у генетичних горизонтах ґрунтів України різного походження, а також проаналізовано магнітомінералогічні параметри. Вивчено фоновий ґрунтовий покрив із педогенним походженням магнітного сигналу та органічним формуванням магнетиків під дією магнетотактичних бактерій Харківської області. Проаналізовано фоновий ґрунтовий покрив із літогенним та педогенним походженням магнітного сигналу Прикарпаття. Досліджено ґрунти, що зазнали впливу вуглеводнів Передкарпатського прогину України, а також техногенно забруднений ґрунтовий покрив (урбаноземі) урбанізованої території міста Дніпро. Для підвищення однозначності інтерпретації магнітних досліджень ґрунтів у контексті дослідження магнетотактичних бактерій рекомендується використовувати електронну мікроскопію (SEM, TEM) та агрохімічні параметри.

Ключові слова: ґрунти, магнетотактичні бактерії, магнітна сприйнятливість, магнетит.

Вступ. Прикладне застосування теорії і методології магнетизму ґрунтового покриву можливе лише на основі глибокого розуміння фізичних основ методу. Це дає змогу побудови оптимальних алгоритмів робіт на всіх етапах від постановки завдання до інтерпретації результатів та надання рекомендацій зацікавленим організаціям та підприємствам. Одним із базисних факторів формування магнетизму ґрунтового покриву є життєдіяльність магнетотактичних бактерій (magnetotactic bacteria). Дослідження ролі магнетотактичних бактерій у формуванні магнетизму ґрунтів є важливою у контексті вивчення незабруднених та незмінених фонових ґрунтових покривів, їх генезису магнітних властивостей, розвитку носіїв магнетизму у процесі ґрунтоутворення, застосування магнітних методів для визначення стану ґрунтів, їх ерозії, впливу пожеж, деградації, деструкції, водних режимів, ущільнення, продуктивності, родючості, вмісту гумусу, фізико-хімічних параметрів, які використовуються в агрономії та ґрунтознавстві [2]. При цьому на сьогодні залишається велика кількість нерозв'язаних проблем, пов'язаних із визначенням походження магнітного сигналу навіть у природних умовно фонових ґрунтах. Наприклад, у роботі [16] показано, що магнетит, який утворюється при неорганічному розщепленні нанокристалічного гетиту, демонструє магнітні властивості та морфологічні ознаки, подібні до властивостей біогенного магнетиту, що продукований магнітосомами магнетотактичних бактерій. У даній статті ми спробуємо розглянути деякі способи формування магнітного сигналу у ґрунтах України та сконцентрувати увагу саме на ролі магнетотактичних бактерій при органічному формуванні феромагнітного матеріалу.

Стан проблеми. Магнетотактичні бактерії зазвичай зустрічаються у ґрунтах, багатих на залізо. У роботі [14] відзначено, що магнітотактичні бактерії подібні до ґрунтових, можна одержувати і у лабораторних умовах, що, у свою чергу, дозволяє синтезувати наночастинки магнетиту (Fe_3O_4). Магнітні частинки, утворені всередині магнітосоми, є стабільними та розрізняються за своїми магнітними властивостями.

У роботі [1] розглядаються мінерали заліза у ґрунтах як основні носії їх магнетизму. Відзначається провідна роль магнетиту, магеміту, гематиту, гетиту, піриту і піротину у системі утворення та діагенетичних змін у процесі

розвитку ґрунтового профілю. Крім того, згадуються наномінерали (наприклад, ферігидрит), які у той же час відіграють головне значення у формуванні магнетиків ґрунтів на початковому рівні їх розвитку. При розгляді бактеріального характеру розвитку вторинних мінералів у ґрунтах важлива роль відводиться магнітотактичним бактеріям та їх магнітосомам [3, 5]. Візуалізація магнітосом та їх типізація на великі стрижнеподібні клітинні форми, вібріони, спірили, кокоїдні форми наводиться у роботі [18]. Відзначається провідна роль оксидів заліза та їх трансформація у процесі педогенезу як умова формування сучасної магнітної картини різних типів ґрунтів [17]. При цьому значущу роль при ідентифікації походження феромагнетиків у ґрунтах відіграє їх розмір та домений стан. Визначальною є границя переходу від однодомного (SD) до суперпарамагнітного (SP) стану магнітних мінералів ґрунтів, який ідентифікує їх педогенний характер. Такі визначення ефективно проводяться на основі вивчення частотної залежності магнітної сприйнятливості [19]. Термомагнітний аналіз є ефективним для визначення магнетиків у ґрунтах. У роботі [8] наведено аналіз температурних залежностей магнітної сприйнятливості та намагніченості насичення для ґрунтів, що формувалися у різних ландшафтних умовах. Інтерпретуються різні фази нагріву та вторинного формування магнітних мінералів.

Детальні лабораторні дослідження [7] зразків ґрунтів Китайського лесового плато та їх магнітних екстрактів вказують на те, що підвищення магнітних властивостей часто пояснюється присутністю магнітом'яких мінералів – магнетиту (Fe_3O_4) або магеміту (γFe_2O_3). Експериментальні дані свідчать про те, що феромагнітні частинки розміром менше за 100 нм утворюються в результаті життєдіяльності магнітотактичних бактерій у ґрунтах.

Магнетики органічного походження. Серед основних джерел формування та процесів накопичення магнітних мінералів у ґрунтах виділяються такі:

1. Педогенного походження – магнетики сформовані у процесі ґрунтоутворення і розвитку ґрунтового профілю. Характерні для незабруднених фонових ґрунтових покривів.

2. Літогенного походження – детритові магнітні мінерали кристалічного фундаменту привнесені у структуру

ґрунтів за рахунок його виходу або близького залягання до денної поверхні.

3. Антропогенного походження – сформовані у процесі впливу на ґрунти діяльності людини, у першу чергу агрономічного обробітку, пожеж тощо.

4. Техногенного походження – привнесені магнітні частинки, магнітні сферули, що пов'язані з високотемпературними техногенними процесами, корозією металів, роботою плавильних комбінатів, теплоелектростанцій, автомобільним трафіком тощо.

5. Вуглеводневого походження – аутогенні магнітні мінерали, що з високою ймовірністю сформувалися у ґрунтах під впливом флюїдів зони розсіювання покладів вуглеводнів або за рахунок виливів нафтопродуктів під час їх видобутку та транспортування.

У рамках запропонованої статті розглянемо більш детально наведені вище, у пункті 1 класифікації, магнетити педогенного походження. Вони можуть бути органічного [3] і неорганічного [13] генезису. Магнітні мінерали неорганічного походження накопичуються під впливом метаболічних процесів ферментації, окисно-відновних реакцій, вивітрювання, а органічного походження – формуються всередині клітин магнетотактичних бактерій.

Магнетотактичні бактерії будують внутрішній постійний магнітний диполь, що базується на одиночних частинках магнітного домену магнетиту, інколи грейгіту. Організми мають високий ступінь контролю за розмірами та морфологією частинок. Це може бути важливим для розбирання біогенних та небіогенних мінеральних частинок заліза. Зауважимо, що грейгіт педогенного походження [6] зустрічається набагато рідше за магнетит. Важливою діагностичною ознакою наявності грейгіту є його стабільна природна залишкова намагніченість.

Розглянемо детальніше процес формування магнітних мінералів у ґрунтах органічного походження за рахунок життєдіяльності мікроорганізмів. Магнетит є основним магнітним мінералом, що міститься у структурі магнітосом. Магнітосома – це бактеріальна магнітна наночастинка, мембранна структура магнетотактичної бактерії, що містить однодомений феромагнітний кристал [9], а у клітині найчастіше міститься 15–20 кристалів магнетиту.

Загальний вигляд магнітотактичних бактерій, зафіксованих у природних об'єктах, наведено на рис. 1. Це клітинні форми різної морфологічної природи, що включають великі стрижнеподібні клітинні форми (вібріони, спірили), кокотидні форми. На рис. 2 наведено магнітосоми магнітотактичних бактерій. Частинки магнітосом можуть бути організовані в один ланцюг (a, b, c, e), два (f, i), кілька ланцюгів (g, h) або бути нерегулярної форми (j, k, l).

За свідченнями, які наводяться у роботі [10], педогенні магнітні мінерали органічного походження можуть бути вторинними продуктами. Йдеться про те, що материнським мінералом для утворення вторинного магнетиту у сильно магнітних ґрунтах під впливом дії магнетотактичних бактерій може виступати наномінерал ферігидрит ($\text{Fe}_2\text{O}_3 \cdot 2\text{FeOOH} \cdot 2.5\text{H}_2\text{O}$). Зауважимо, що первинний ферігидрит у процесі свого старіння призводить до формування гематиту ($\alpha\text{Fe}_2\text{O}_3$) – найпоширенішого антиферомагнітного мінералу ґрунтів [15].

Магнітосоми чистих стабільних однодомних зерен (SD) виробляються внутрішньоклітинно та ідентифікуються у магнітних екстрактах ґрунтів за допомогою просвічуючого електронного мікроскопа. З цього випливає, що у природних незмінених ґрунтах можуть одночасно бути стабільні однодомні зерна – магнітосоми бактеріального походження, а також суперпарамагнітні зерна (SP) неорганічного походження. Для виявлення доменного стану магнетиків у ґрунтах застосовують показники частотної залежності магнітної сприйнятливості χ_{fd} , безгістерезисна (ідеальна) магнітна сприйнятливості χ_{ARM} , ізотермічна намагніченість насичення IRM, параметри петлі гістерезису, параметр S – відношення магнітом'якої (магнетит) до магнітожорсткої (гематит, гетит) компоненти IRM.

Доказом присутності магнітних частинок бактеріального походження (магнітосом) є наявність структурно впорядкованих магнітних зерен. Велика кількість експериментальних даних вказує на низьку концентрацію у зразках ґрунтів магнетотактичних бактерій, а отже і магнітних мінералів органічного бактеріального походження [10]. Тому, ведучи мову про педогенний (природний) генезис магнітного матеріалу у структурі ґрунтів, слід говорити про домінуючу роль процесів вивітрювання та вторинну роль магнітотактичних бактерій.

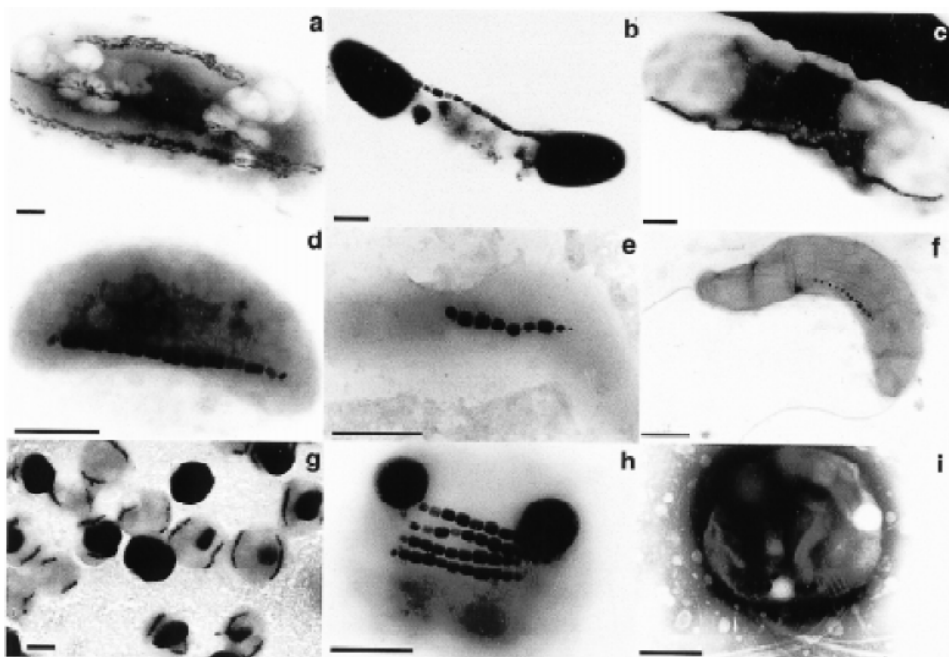


Рис. 1. Електронні мікрознімки магнетотактичних бактерій [17]:

a, b, c – великі стрижнеподібні клітинні форми; d – вібріони; e, f – спірили; g, h, i – кокотидні форми

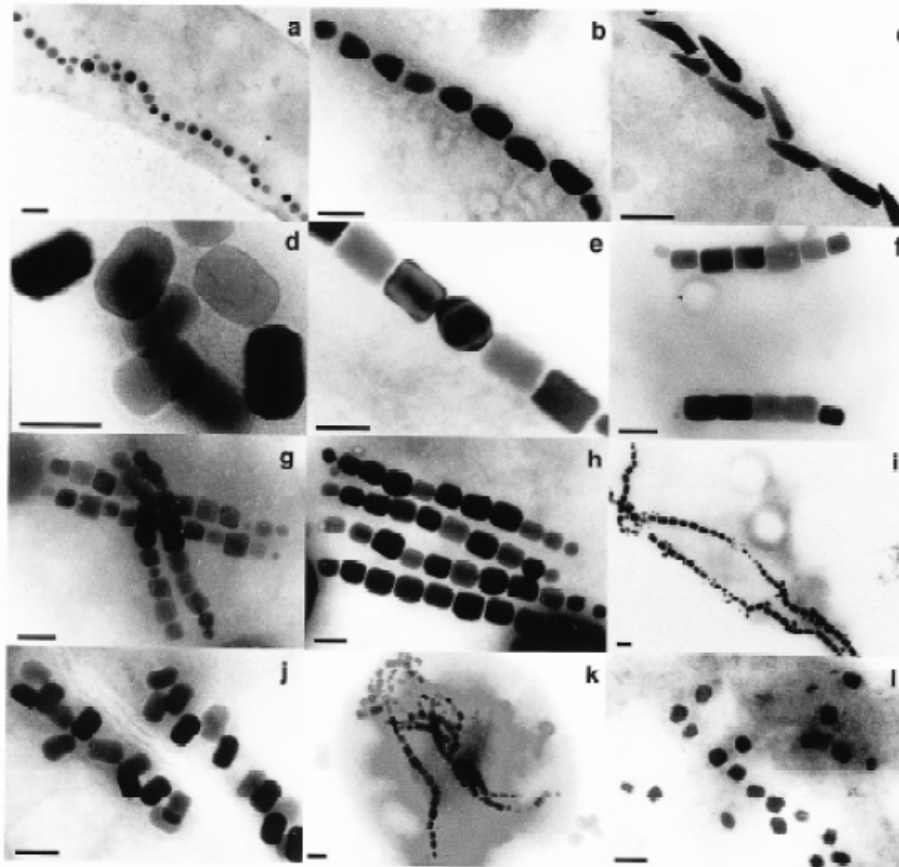


Рис. 2. Електронні мікрознімки магнітосом різних магнітотактичних бактерій [17]:

a – кубооктогедральна форма; b, c – кулеподібні; d, e, f, g, h, i, j, k – подовжені призматичні; l – прямокутні

Зауважимо, що розбравка ультрадисперсних SP зерен та SD магнітосом є доволі складним процесом, що вимагає чіткої інтерпретаційної процедури. Відповідні дослідження мають включати, окрім магнітних досліджень, також електронні мікроскопічні аналізи.

Приклади дослідження ґрунтів із різним походженням магнітного сигналу.

Для розуміння відмінностей у будові генетичних горизонтів ґрунтів та характеру зміни їх магнітних властивостей звернемося до рис. 3. На рис. 3, а наведено графік розподілу з глибиною магнітної сприйнятливості для незабрудненого умовно фоновому чорнозему Харківської області. Значення магнітної сприйнятливості високі: у верхньому гумусовому горизонті А становлять $70-80 \times 10^{-8} \text{ м}^3/\text{кг}$. У даному випадку кристалічні породи не впливають на формування магнітних властивостей. Також відсутній вплив техногенного забруднення. Магнітомінералогічні аналізи показали, що лівова частина магнітних зерен перебуває в однодомному стабільному або псевдоодномному стані, що є свідченням внеску магнітотактичних бактерій у формування дрібнодисперсного магнетиту педогенного походження. Крім того, ґрунтоутворні термофізичні умови є сприятливими для розвитку таких бактерій. Магнетит зафіксовано за переходом Вервея у діапазоні $-150 \text{ }^\circ\text{C}$. За результатами вивчення частотної залежності магнітної сприйнятливості підтверджено вміст суперпарамагнітної фази, що свідчить про деякий внесок неорганічних магнітомінералогічних перетворень у процесі вивітрювання материнської підстильної породи. Проте даний вплив є незначним.

На рис. 3, б наводиться графік розподілу з глибиною магнітної сприйнятливості для незабрудненого умовно фоновому гірського ґрунтового покриву Прикарпаття України з візуалізацією впливу літогенної основи. Ґрунтовий покрив гірсько-лісових масивів Прикарпаття в цілому є слабомагнітним, його питома магнітна сприйнятливість

не перевищує $25 \times 10^{-8} \text{ м}^3/\text{кг}$, ґрунтовий покрив малодиференційований за магнітними властивостями. Подібні тенденції фіксуються і для флішових підстильних порід. Магнітна сприйнятливості верхніх гумусних горизонтів (горизонт А за міжнародною класифікацією WRB) лежить у межах $15-25 \times 10^{-8} \text{ м}^3/\text{кг}$, підстильні гірські породи типу флішу: $\chi = 5-15 \times 10^{-8} \text{ м}^3/\text{кг}$, валунний матеріал, що фіксувався практично при переході до річки: $\chi = 1 \times 10^{-8} \text{ м}^3/\text{кг}$. Ґрунтовий покрив кам'янистий, потужність верхнього гумусного горизонту А не перевищує 10 см, із включеннями уламкового матеріалу. Іноді у межах поширення дерев верхній горизонт ґрунтового покриву укритий дерново-коричневою подушкою. Проте найчастіше ґрунти сіруваті, нерозвинені, близькі до материнської флішової породи. Отже, педогенний процес є молодим, органічна речовина майже відсутня, а загальні умови для життєдіяльності магнітотактичних бактерій є малосприятливими. Залізо перебуває часто у двовалентному стані, і його сполуки не беруть участь у формуванні феромагнітного матеріалу. Вміст гумусу низький, високий ступінь оглеєння. Зафіксовані нами магнетити даного ґрунту найчастіше належать до гетитової та гематитової магнітної фази, перебувають у псевдоодномомній фазі. Таким чином, роль магнітотактичних бактерій фактично прямує до нуля.

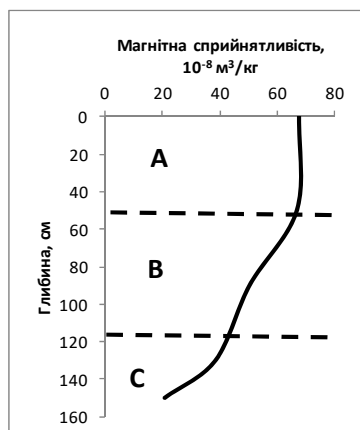
На рис. 3, в наведено розподіл магнітної сприйнятливості у генетичних горизонтах ґрунтового покриву насиченого процесами просочування вуглеводнів поблизу свердловини Надія-1, Передкарпатський прогин України, полігон Старуня. В околі свердловини фактично всі геологічні горизонти та ґрунти є просяклыми вуглеводнями, розсолами та газами. Глибина розрізу склала 40 см. У його межах було ідентифіковано горизонти А, В, С₁ та С₂. Потужність горизонту А становить 10 см, $\chi = 42-197 \times 10^{-8} \text{ м}^3/\text{кг}$. Верхній шар ґрунтів під впливом інтенсивного мікропросочування вуглеводнів фактично

трансформувався у кірку. Більш високий магнітний сигнал був зафіксований нами у межах перехідного горизонту В, що залягав на глибині 10–20 см із магнітною сприйнятливістю до $250 \times 10^{-8} \text{ м}^3/\text{кг}$. Підстильні породи горизонту С₁ характеризуються екстремально високими величинами магнітної сприйнятливості до $440 \times 10^{-8} \text{ м}^3/\text{кг}$. У глибшому горизонті С₂ фіксується пониження магнітної сприйнятливості, хоча абсолютні значення залишаються високими, до $250 \times 10^{-8} \text{ м}^3/\text{кг}$. Необхідно ще раз зауважити, що всі описані горизонти включають бітуми, озокерити та інші ефекти міграції вуглеводнів. У даному контексті вести мову про роль магнетотактичних бактерій педогенної природи важко. Проте проявляється переважна роль життєдіяльності мікроорганізмів та їх взаємодії з органічною речовиною вуглеводневого походження. Це веде до формування аутогенних сильно магнітних мінералів. Ми визначили переважання піротинової та магнетитової фази у псевдооднорідному стані.

На рис. 3, г розглядається приклад зміни із глибиною магнітної сприйнятливості для техногенно забрудненого ґрунту міста Дніпра. Як видно з рисунку, зараження ґрунтів спостерігається до глибини 30 см. На глибині 0–30 см магнітна сприйнятливість досягає екстремально високих значень: $\chi = 300\text{--}400 \times 10^{-8} \text{ м}^3/\text{кг}$. На глибині понад 40 см спостерігається вирівнювання кривої, абсолютні значення спадають до величин, що притаманні незабрудненим фоновим ґрунтам, де магнітна сприйнятливість становить $40\text{--}50 \times 10^{-8} \text{ м}^3/\text{кг}$, а з переходом до ґрунтоутворних порід на глибині 100 см спадає до $20\text{--}30 \times 10^{-8} \text{ м}^3/\text{кг}$. Це свідчить про те, що техногенні антропогенні фракції

накопичуються переважно на денній поверхні ґрунтів і проникають у їх структуру не глибше за горизонт В. Проаналізовані матеріали підтверджуються інтерпретацією частотної залежності магнітної сприйнятливості ґрунтів. На глибині 0–30 см $\chi_{\text{ка}} \leq 3\text{--}4\%$, у верхньому шарі ґрунту лише 1,5%. Із глибиною її значення зростають і досягають 8–10 на глибині 100 см. Це свідчить про превалювання крупнозернистого мультидоменного магнетиту техногенного походження у верхніх шарах. У даному випадку роль магнетотактичних бактерій розглядати недоцільно.

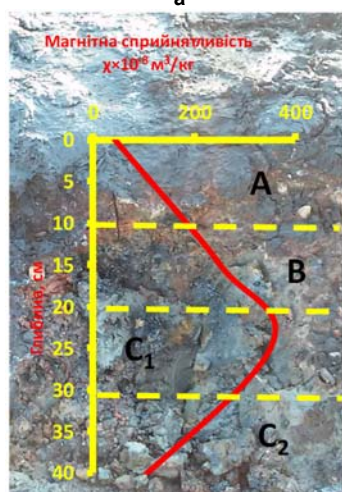
Слід зауважити, що вплив магнетотактичних бактерій часто підвищується при формуванні ґрунтового покриву на лесовій основі. Дана ситуація характерна для території Дніпровсько-Донецької западини (ДДЗ) України, яка є одним із основних вуглеводневих басейнів України [11, 12]. Підтвердженням цього є результати дослідження магнетотактичних бактерій у ґрунтового покриву Китайського лесового плато. Так, у роботі [4] досліджено морфологічні характеристики та мікроструктуру магнітних мінералів лесів, палеоґрунтів та сучасного ґрунтового покриву. Визначено, що маґеміт утворився з магнетиту шляхом його окиснення. Одночасно нанопористий магнетит мікробіологічної природи і магнетит магнетосом магнетотактичних бактерій безпосередньо пов'язані з активністю мікроорганізмів та процесом педогенезису. Нанокристалічні та нанопористі магнетитові зерна інтенсивніше утворюються з маґеміту у напівзасушливих середовищах. У той же час гематит, хоча і є термодинамічно стабільною фазою, проте переважає у більш гідроморфних умовах.



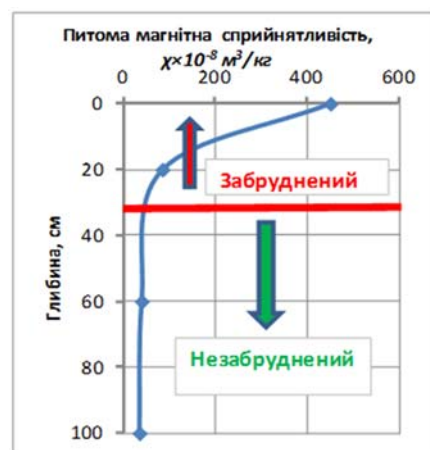
а



б



в



г

Рис. 3. Розподіл магнітної сприйнятливості у генетичних горизонтах ґрунтів різного походження: а – фоновий ґрунтий покрив із педогенним походженням магнітного сигналу та внеском магнетотактичних бактерій; б – фоновий ґрунтий покрив із літогенним та педогенним походженням магнітного сигналу; в – ґрунтий покрив, що зазнав впливу вуглеводнів; г – техногенно забруднений ґрунтий покрив урбанізованої території (урбанозем)

Висновки. Таким чином, магнетотактичні бактерії формують магнітні властивості природних ґрунтових покривів поза значущим впливом літогенної основи, відсутності прямого впливу вуглеводнів та техногенного забруднення ґрунтів. Магнетит органічного походження, що розвивається у магнітосомах, може виступати основним феромагнітним мінералом фонових ґрунтів та впевнено ідентифікується комплексом магнітомінералогічних аналізів: термомагнітні криві нагріву та охолодження, параметри петлі гістерезису, криві ізотермічної залишкової намагніченості, частотної залежності магнітної сприйнятливості. Розробка магнітного сигналу органічного походження необхідна при моніторингу забруднення урбанізованих територій, визначенні родючості та ерозійних процесів ґрунтів, дослідженні територій покладів вуглеводнів. Це пояснюється важливістю врахування фонового магнітного сигналу природних ґрунтів та визначення ролі літогенної основи. Магнетотактичні бактерії та їх магнітосоми є однією з основ при розгляді фізико-хімічних принципів застосування магнітного методу з метою вивчення ґрунтового покриву. Для підвищення однозначності інтерпретації магнітних досліджень ґрунтів у контексті дослідження магнетотактичних бактерій рекомендується використовувати електронні мікроскопічні високороздільні знімки та агрохімічні параметри.

Підтвердження. Робота виконана у рамках держбюджетної теми № 18БП049-01 "Сучасні технології моніторингу природних та природно-техногенних процесів для оцінки впливу на об'єкти критичної інфраструктури".

Список використаних джерел:

1. Водяницький Ю.Н. Соединения железа и их роль в охране почв / Ю. Н. Водяницький. – М. : ГНУ Почвенный институт им. В.В. Докучаева Россельхозакадемии. – 2010. – 154 с.
2. Меньшов О.І. Застосування магнітних методів для контролю деградації продуктивних земель / О. І. Меньшов // Геофіз. журнал. – 2016. – № 4(38). – С. 130–137.
3. Blakemore R.P. Magnetotactic bacteria / R.P. Blakemore // *Annual Reviews in Microbiology*. – 1982. – № 36(1). – P. 217–238.
4. Characteristics and genesis of maghemite in Chinese loess and paleosols: mechanism for magnetic susceptibility enhancement in paleosols / T. Chen, H. Xu, Q. Xie, J. Chen, J. Ji, H. Lu // *Earth and Planetary Science Letters*. – 2005. – № 240(3-4). – P. 790-802.
5. Fassbinder J. W. Occurrence of magnetic bacteria in soil / J. W. Fassbinder, H. Stanjek, H. Vali // *Nature*. – 1990. – № 343(6254). – P. 161–163.
6. Frankel R. B. Single magnetic domains in magnetotactic bacteria / R. B. Frankel, J. P. Zhang, D. A. Bazylinski // *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*. – 1998. – № 103(B12). – P. 30601–30604.
7. Heller F. Loess magnetism / F. Heller, M. E. Evans // *Reviews of Geophysics*. – 1995. – № 33(2). – P. 211–240.
8. Jordanova D. Thermomagnetic behavior of magnetic susceptibility – heating rate and sample size effects / D. Jordanova, N. Jordanova // *Front. Earth Sci.* – 2016. – № 3. – P. 90.
9. Komeili A. Magnetosomes Are Cell Membrane Invaginations Organized by the Actin-Like Protein MamK // *A. Komeili, Z. Li, D.K. Newman // Science*. – 2006. – № 311. – P. 242–245.
10. Magnetic, geochemical and DNA properties of highly magnetic soils in England / J. A. Dearing, J. A. Hannam, A. S. Anderson, E. M. H. Wellington // *Geophysical Journal International*. – 2001. – № 144(1). – C. 183–196.
11. Magnetic mapping and soil magnetometry of hydrocarbon prospective areas in western Ukraine / O. Menshov, R. Kudeavets, S. Vyzhva, I. Chobotok, T. Pastushenko // *Studia Geophysica et Geodaetica*. – 2015. – № 59(4). – P. 614–627.
12. Magnetic studies at Starunia paleontological and hydrocarbon bearing site (Carpathians, Ukraine) / O. Menshov, R. Kudeavets, S. Vyzhva, V. Maksymchuk, I. Chobotok, T. Pastushenko // *Studia Geophysica et Geodaetica*. – 2016. – № 60(4). – P. 731–746.
13. Maher B.A. Characterisation of soils by mineral magnetic measurements / B.A. Maher // *Physics of the Earth and Planetary Interiors*. – 1986. – № 42(1). – P. 76–92.

14. Nguyen T. T. M. Potential of Magnetotactic Bacteria for the Fabrication of Iron Nanoparticles / T. T. M. Nguyen, M.D. Baviskar, P. Bernazzani // *TMS 2017 146th Annual Meeting & Exhibition Supplemental Proceedings*. – 2017. – P. 13–21.

15. Ordered ferrimagnetic form of ferrihydrite reveals links among structure, composition, and magnetism / F. M. Michel, V. Barrón, J. Torrent, M. P. Morales, C. J. Serna, J. F. Boily, G. E. Brown // *Proceedings of the National Academy of Sciences*. – 2010. – № 107(7). – P. 2787–2792.

16. Presumed magnetic biosignatures observed in magnetite derived from abiotic reductive alteration of nanogoethite / J. L. Till, Y. Guyodo, F. Lagroix, G. Morin, N. Menguy, G. Ona-Nguema // *Comptes Rendus Géoscience*. – 2017. – № 349 (2). – P. 63–70.

17. Schwertmann U. The effect of pedogenic environments on iron oxide minerals / U. Schwertmann // *Adv. Soil Sci.* – 1985. – № 1. – P. 171–200.

18. Schüler D. Formation of magnetosomes in magnetotactic bacteria / D. Schüler // *Journal of molecular microbiology and biotechnology*. – 1999. – № 1(1). – P. 79–86.

19. Taylor R.M. Magnetite in soils: I. The synthesis of single-domain and superparamagnetic magnetite / R. M. Taylor, B.A. Maher, P.G. Self // *Clay Miner.* – 1987. – № 22. – P. 411–422.

References:

1. Vodyanitskiy, YU.N. (2010). Soyedineniya zheleza i ikh rol' v okhrane pochv. Moskva: GNU Pochvennyy institut im. V.V. Dokuchayeva Rossel'khozakademii. [in Russian].
2. Men'shov, O.I. (2016). Zastosuvannya mahnitnykh metodiv dlya kontrolyu dehradatsiyi produktyvnykh zemel'. *Heofizychnyy zhurnal*, 4(38), 130–137. [in Ukrainian].
3. Blakemore, R.P. (1982). Magnetotactic bacteria. *Annual Reviews in Microbiology*, 36(1), 217-238.
4. Chen, T., Xu, H., Xie, Q., Chen, J., Ji, J., & Lu, H. (2005). Characteristics and genesis of maghemite in Chinese loess and paleosols: mechanism for magnetic susceptibility enhancement in paleosols. *Earth and Planetary Science Letters*, 240(3-4), 790-802.
5. Fassbinder, J. W., Stanjek, H., Vali, H. (1990). Occurrence of magnetic bacteria in soil. *Nature*, 343(6254), 161-163.
6. Frankel, R. B., Zhang, J. P., & Bazylinski, D. A. (1998). Single magnetic domains in magnetotactic bacteria. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 103(B12), 30601-30604.
7. Heller, F., & Evans, M. E. (1995). Loess magnetism. *Reviews of Geophysics*, 33(2), 211-240.
8. Jordanova, D., Jordanova, N. (2016). Thermomagnetic behavior of magnetic susceptibility – heating rate and sample size effects. *Front. Earth Sci.*, 3, 90.
9. Komeili, A., Li, Z., Newman, D.K. (2006). Magnetosomes Are Cell Membrane Invaginations Organized by the Actin-Like Protein MamK. *Science*, 311, 242-245.
10. Dearing, J.A., Hannam, J.A., Anderson, A.S., Wellington, E.M.H. (2001). Magnetic, geochemical and DNA properties of highly magnetic soils in England. *Geophysical Journal International*, 144(1), 183-196.
11. 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(4), 614-627.
12. 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(4), 731-746.
13. Maher, B.A. (1986). Characterisation of soils by mineral magnetic measurements. *Physics of the Earth and Planetary Interiors*, 42(1), 76-92.
14. Nguyen, T. T. M., Baviskar, M. D., & Bernazzani, P. (2017). Potential of Magnetotactic Bacteria for the Fabrication of Iron Nanoparticles. In *TMS 2017 146th Annual Meeting & Exhibition Supplemental Proceedings* (pp. 13-21). Springer, Cham.
15. Michel, F.M., Barrón, V., Torrent, J., Morales, M.P., Serna, C.J., Boily, J.F., Brown, G.E. (2010). Ordered ferrimagnetic form of ferrihydrite reveals links among structure, composition, and magnetism. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 107(7), 2787-2792.
16. Till, J. L., Guyodo, Y., Lagroix, F., Morin, G., Menguy, N., Ona-Nguema, G. (2017). Presumed magnetic biosignatures observed in magnetite derived from abiotic reductive alteration of nanogoethite. *Comptes Rendus Géoscience*, 349 (2), 63-70.
17. Schwertmann, U. (1985). The effect of pedogenic environments on iron oxide minerals. *Adv. Soil Sci.*, 1, 171-200.
18. Schüler, D. (1999). Formation of magnetosomes in magnetotactic bacteria. *Journal of molecular microbiology and biotechnology*, 1(1), 79-86.
19. Taylor, R.M., Maher, B.A., Self, P.G. (1987). Magnetite in soils: I. The synthesis of single-domain and superparamagnetic magnetite. *Clay Miner.*, 22, 411-422.

Надійшла до редколегії 28.01.18

O. Menshov, Dr. Sci. (Geol.), Senior Researcher
E-mail: menshov.o@ukr.net
Taras Shevchenko National University of Kyiv, Institute of Geology
90 Vasykivska Str., Kyiv, 03022, Ukraine

THE ROLE OF MAGNETOTACTIC BACTERIA IN FORMATION OF NATURAL MAGNETISM OF UKRAINE SOILS

The study of the role of magnetotactic bacteria in the formation of soil magnetism is important for the investigation of natural unpolluted soils. We consider the genesis of the magnetic properties of the soil, the development of carriers of magnetism under the soil formation, the use of magnetic methods for determining the soil state, erosion, the effects of fires, degradation, destruction, water regimes, compaction, productivity, fertility, humus content, physicochemical parameters that are used in agronomy and soil science. Magnetotactic bacteria are found in soils rich in iron. Magnetosomes of pure stable single-domain grains (SD) are formed intracellular and identified in magnetic soil extracts by transmission electron microscopy. Natural soils can contain both stable single-domain grains – magnetosomes of bacterial origin, and superparamagnetic grains (SP) of inorganic origin. Magnetotactic bacteria form the magnetic properties of natural soil in case of non-availability of the lithogenic base influence, hydrocarbons and man-made pollution impact. This article studies the distributions of the magnetic susceptibility in the genetic horizons of soils of Ukraine of different origin. The magnetic mineralogical parameters are analyzed too. The natural soils with the predominance of pedogenic magnetic signal and the organic formation of magnetic minerals under the influence of magnetotactic bacteria of the Kharkov Oblast have been studied. Moreover, the natural soils with both lithogenic and pedogenic signal of the Carpathians were investigated. The soils affected by hydrocarbons of the Precarpathians of Ukraine were considered. Man-made pollution of the urban soils of Dnipro agglomeration was analyzed. To increase the quality of the interpretation of soil magnetism to study magnetotactic bacteria we recommend using the electron microscopic high-precision images (SEM, TEM) and agrochemical parameters.

Keywords: soil, magnetotactic bacteria, magnetic susceptibility, magnetite.

A. Меньшов, д-р геол. наук, ст. наук. співроб.
E-mail: menshov.o@ukr.net
Киевский национальный университет имени Тараса Шевченко
УНИ "Институт геологии", ул. Васильковская, 90, Киев, 03022, Украина

РОЛЬ МАГНЕТОТАКТИЧЕСКИХ БАКТЕРИЙ В ФОРМИРОВАНИИ ПРИРОДНОГО МАГНЕТИЗМА ПОЧВ УКРАИНЫ

Исследование роли магнетотактических бактерий в формировании магнетизма почв является важным в контексте изучения не-загрязненных и неизменных фоновых почвенных покровов. Речь идет о генезисе магнитных свойств почвы, развитии носителей магнетизма в процессе почвообразования, применении магнитных методов для определения состояния почвы, эрозии, воздействия пожаров, деградации, деструкции, водных режимов, уплотнения, продуктивности, плодородия, содержания гумуса, физико-химических параметров, которые используются в агрономии и почвоведении. Магнетотактические бактерии встречаются в почвах богатых железом. Магнитосомы чистых стабильных однодоменных зерен (SD) формируются внутриклеточно и идентифицируются в магнитных экстрактах почв с помощью просвечивающей электронной микроскопии. В естественных природных почвах могут одновременно присутствовать стабильные однодоменные зерна – магнитосомы бактериального происхождения, а также суперпарамагнитные зерна (SP) неорганического происхождения. Магнетотактические бактерии формируют магнитные свойства природных почвенных покровов без влияния литогенной основы, при отсутствии прямого воздействия углеводородов и техногенного загрязнения. Приведены распределения магнитной восприимчивости в генетических горизонтах почв Украины разного происхождения, а также проанализированы магнитоминералогические параметры. Изучены фоновый почвенный покров с педогенным происхождением магнитного сигнала и органическим формированием магнетиков под воздействием магнетотактических бактерий Харьковской области. Фоновый почвенный покров с литогенным и педогенным происхождением магнитного сигнала Прикарпатья. Почвенный покров, который подвергся влиянию углеводородов Предкарпатского прогиба Украины. Техногенно-загрязненный почвенный покров (урбаноземы) урбанизированной территории города Днепр. Для повышения однозначности интерпретации магнитных исследований почв в контексте изучения магнетотактических бактерий рекомендуется использовать электронные микроскопические высокоточные снимки (SEM, TEM) и агрохимические параметры.

Ключевые слова: почва, магнетотактические бактерии, магнитная восприимчивость, магнетит.