

УДК 550.382.3

DOI: <http://doi.org/10.17721/1728-2713.100.05>

А. Сухорада¹, канд. геол.-мінералог. наук, доц., ветеран університету;
О. Меньшов¹, д-р геол. наук, ст. дослідник,
E-mail: menshov.o@ukr.net;

К. Бондар¹, д-р геол. наук, ст. наук. співроб.;
О. Круглов², канд. геол. наук, ст. наук. співроб.;
Р. Хоменко¹, канд. геол. наук, асист.;

С. Попов¹, канд. геол. наук;
¹Київський національний університет імені Тараса Шевченка,
ННІ "Інститут геології", вул. Васильківська, 90, м. Київ, 03022, Україна;
²ННЦ "Інститут ґрунтознавства та агрохімії імені О.Н. Соколовського",
вул. Чайковська, м. Харків-24, 461024, Україна

ГЕОФІЗИКА ПЕДОСФЕРИ В КИЇВСЬКОМУ УНІВЕРСИТЕТІ

(Представлено членом редакційної колегії д-ром геол. наук, доц. О.В. Шабатурою)

Розглянуто розвиток досліджень геофізики педосфери у Київському національному університеті імені Тараса Шевченка за останні 30 років. Педосфера є унікальним та надзвичайно інформативним об'єктом з погляду геофізичних досліджень. У фізичних та хімічних властивостях об'єктів, які об'єднує в собі педосфера, проявляються пошукові ознаки покладів корисних копалин, процеси ґрунтоутворення, антропогенний вплив під час аграрного виробництва, забруднення природного навколишнього середовища, палеогеографічні процеси, історія розвитку людства як археологічна спадщина. В Україні дослідження магнетизму ґрунтового покриву розпочалося у 90-х роках ХХ століття в Київському університеті на базі Студентського конструкторсько-дослідницького бюро. На сьогодні дослідження усіх напрямів геофізики педосфери тривають. Поглиблюється розуміння фізичних основ та методологія геофізики педосфери, досліджується магнітна мінералогія ґрунтів у залежності від умов формування або привнесення: педогенез, техногенез, вплив вуглеводнів і т. ін. Нові дані одночасно верифікують вже існуючі теоретичні розробки, а також формують запитання щодо невідомих аспектів вивчення педосфери. Дослідження відбуваються як на макрорівнях у межах сільськогосподарських технологічних ділянок (полів), міських агломерацій, нафтогазоносних областей, так і на мікрорівні для найдрібніших ґрунтових агрегатів (педон), магнітних мінералів, магнітоактивних доменів тощо. Наведено результати магнітних, магнітометричних, електрометричних та георадарних досліджень у різних сферах життєдіяльності.

Ключові слова: ґрунтовий покрив, педосфера, геофізика, магнітна сприйнятливість, магнітометрія, електрометрія.

Вступ. Одним із важливих об'єктів дослідження в науках про Землю на сучасному ґносеологічному рівні є педосфера (дав.-гр. πῆδον, pedon, педон – ґрунт і дав.-гр. σφαῖρα – сфера) – як планетарна багатокомпонентна оболонка. За уявленнями сучасних ґрунтознавців, з якими погоджуються автори даної статті, терміни "педосфера" і "ґрунтовий покрив Землі" не рівнозначні ([див. <https://uk.wikipedia.org>](https://uk.wikipedia.org)). Педосфера є унікальним та надзвичайно інформативним об'єктом з погляду геофізичних досліджень. Це поверхнева оболонка Землі, що поєднує потоки речовини та енергії, що надходять на поверхню суші: екзогенні та ендегенні, абіотичні і біотичні, природні й антропогенні, що, у свою чергу, визначає формування біосферних природно-історичних тіл ґрунтового та підґрунтового екоярусів біосфери з особливим рівнем організації матерії. У науках про Землю та власне геології відбувається постійне вивчення процесів, явищ, фізичних та хімічних властивостей, які стосуються таких оболонок Землі, як літосфера, атмосфера і гідросфера. Водночас педосфера інтегрує в собі основні найважливіші ознаки всіх інших сфер. На генеральній асамблеї Європейського геонаукового союзу (EGU) відзначено, що дослідження ґрунтового покриву є ключем до розуміння більшості геологічних процесів, що відбуваються на Землі, а власне ґрунти та сформовані ними ландшафти найчастіше несуть необхідну для дослідників інформацію про поклади корисних копалин, забруднення довкілля, ерозійні процеси тощо (*Abd-Elmabod et al., 2015*).

Ефективним ключем для розуміння ендегенних та екзогенних процесів, які відбуваються в літосфері, атмосфері та гідросфері, є геофізичне вивчення саме педосфери. У фізичних та хімічних властивостях об'єктів, які об'єднує в собі педосфера (передусім ґрунтового покриву), проявляються ознаки покладів корисних копалин, процеси ґрунтоутворення, антропогенний вплив аграрного виробництва, забруднення природного навколишнього середовища, палеогеографічні процеси,

археологічні об'єкти – як відбиток історії розвитку людства. Сучасна геофізика з успіхом дозволяє ідентифікувати усі зазначені процеси та об'єкти на основі інструментальних неінвазивних технологій та моделювання. Різні моделі педосфери спрямовані на вирішення широкого кола поставлених завдань. Геофізичне моделювання педосфери пройшло шлях від певної евристичності до формування реальних та натурних моделей. При цьому автори пропонують використання динамічної моделі ґрунтового покриву, яка характеризується низкою переваг над статичною. У світовій практиці відзначається (*Mello, 2020*), що використання геофізичних методів у геології, останнім часом набуває важливого значення і для ґрунтознавства. Проте більшість досліджень зосереджені на атрибутивному моделюванні та картографуванні, і лише незначна увага приділяється розумінню процесів, що відбуваються в педосфері, а також взаємозв'язку з навколишнім природним середовищем (геологія, рельєф, геохімія та гідрологія).

Одним із найефективніших методів стали магнітні (включаючи як вивчення магнетизму природних об'єктів, так і магнітометрію), електрометрія та георадарні вишукування. Кожний із геофізичних методів, застосовуваних у дослідженні педосфери, на сьогодні перебуває на різному рівні свого розвитку та характеризується різною інформативністю залежно від завдань робіт. У той же час основною ознакою геофізичних методів у дослідженні педосфери є низька вартість, експресність, висока ефективність та неінвазивність.

Теоретичні та методологічні аспекти дослідження ґрунтового покриву за допомогою геофізичних методів належать до фундаментальної частини вивчення геофізики педосфери. Для створення загальної теорії та методології геофізичного моделювання педосфери необхідно повноцінно розуміти власне об'єкт досліджень, інформативність методів його вивчення, статичні та динамічні особливості досліджуваних геофізичних полів (*Меньшов та Сухорада, 2017*).

© Сухорада А., Меньшов О., Бондар К., Круглов О., Хоменко Р., Попов С., 2023

Історія розвитку. В Україні дослідження магнетизму ґрунтового покриву розпочалося у 90-х роках ХХ ст. в Київському національному університеті імені Тараса Шевченка. Центром таких досліджень стало Студентське конструкторсько-дослідницьке бюро (СКДБ). Засновником цього напрямку є автор даної статті доцент Анатолій Васильович Сухорада, а всі інші автори – його учні. Серед перших дослідників магнітних властивостей ґрунтів слід згадати М. Гузія, А. Жадана, Д. Іваненка (*Жадан та ін., 1997*). Об'єктами досліджень стали розподіл магнітних властивостей ґрунтового покриву за їх типами, зв'язок з ґрунотвірним процесом, палеорекострукції. До співпраці та консультацій запрошувалися вчені-ґрунтознавці провідних наукових та освітніх закладів (Інститут географії НАНУ, НУБІП, ХНАУ, ННЦ "Інститут ґрунтознавства та агрохімії імені О.Н. Соколовського"). Результатом такої роботи стали методичні численні напрацювання (*Сухорада та Гузій, 2003*), створена і продовжує поповнюватись база даних магнетизму ґрунтів України (*Сухорада та ін., 2000*). Вивчення геофізичних характеристик ґрунтового покриву було включено до навчальних програм (*Сухорада, 2002*). Результатами геофізичних досліджень педосфери, у тому числі магнітних досліджень ґрунтового покриву, стала низка захищених кандидатських, а пізніше і докторських дисертацій (К. Тяміна (Бондар), О. Круглов, О. Меньшов, Р. Хоменко, С. Попов). Як еталонні досліджувались магнітні властивості ґрунтів заповідних територій: Хомутовський степ, Михайлівська цілина, національний заповідник Асканія-Нова. З іншого боку, проводилися дослідження забруднених ґрунтів околиць міст Маріуполь та Кривий Ріг та примітивних ґрунтів, розвинених на виходах кристалічного фундаменту в межах Українського кристалічного щита.

Перед дослідниками на стартовому етапі агрогеофізичних досліджень постало три основних завдання:

1. Створення магнітної моделі ґрунтового покриву.

2. Розв'язання проблеми девіації при проведенні агромагнітометричних зйомок.

3. Створення відповідної апаратурної бази.

У 2000-х роках основну частину цих завдань було реалізовано. Змогу розвивати ці дослідження надало створенням спеціалізованого підприємства ДП "Агрогеофізика" НАК "Надра України". Досліджувались магнітні та електричні властивості ґрунтів у трьох основних напрямках: для виконання завдань геологічної розвідки, екологічних досліджень та для потреб аграрного сектору економіки – для вирішення завдань ґрунтознавства та агрономії (*Меньшов та ін., 2012*). Саме останній напрям дозволив досягти значущих результатів. Досліджуючи різні види магнітної сприйнятливості та залишкову намагніченість ґрунтового покриву, було зроблено важливі висновки в напрямках перебігу педогенезу, ерозієзнавства, прикладної агрономії.

На сьогодні за усіма зазначеними напрямками дослідження тривають. Більше уваги приділяється глибшому розумінню фізичних основ геофізики педосфери, дослідженню магнітної мінералогії ґрунтів залежно від умов формування або накопичення магнітного матеріалу: педогенез, техногенез, вплив вуглеводнів і т.д.

Далі розглянемо декілька прикладів досліджень з метою ілюстрації високої інформативності застосування геофізичних методів під час вивчення педосфери.

ґрунтознавство та аграрне господарство. Світовий досвід вказує на ефективність застосування магнітних параметрів у дослідженні агрономічних показників родючих ґрунтів (*Pavli et al., 2022*). Як приклад наших власних досліджень в Україні розглянемо вивчення ерозії ґрунтів. Методичною основою для проведення таких досліджень є зв'язок вмісту органічної речовини та магнітної сприйнятливості (МС, χ) ґрунту. Наведений графік демонструє взаємозв'язок цих характеристик та однієї з найважливіших складових математичних моделей ерозії – топографічного фактора LS (рис. 1). Дослід виконано на схилі ділянці чорнозему опідзоленого на Харківщині.

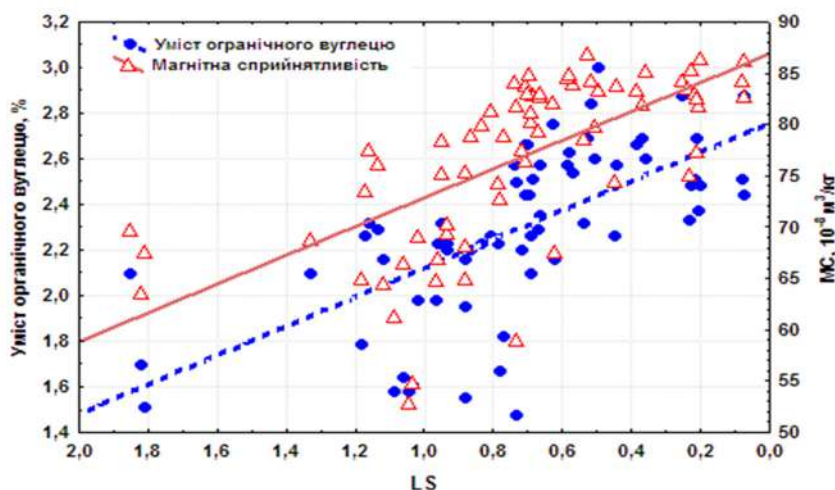


Рис. 1. Взаємозв'язок вмісту органічного вуглецю, магнітної сприйнятливості ґрунту та результатів математичного моделювання ерозії

У даному випадку коефіцієнт кореляції між досліджуваними показниками становить 0,85–0,90. Також спостерігається високий ступінь зв'язку між ними та вмістом у ґрунті фізичної глини, тобто гранулометричних часток розмірами, меншими за 0,01 мм. Подібні результати отримані і на більш великих обсягах вибірок зразків (за умови відносно простих форм схилів). Цей факт

дозволив нам рекомендувати МС для коригування результатів математичного моделювання ерозійних процесів як дешевий та швидкісний метод опробування ґрунту, який дозволяє виправляти похибки, внесені некоректними вихідними матеріалами чи змінами функціонального стану протиерозійних об'єктів (*Круглов та ін., 2020*). На черзі постало завдання дослідження зв'язку

МС з іншими ґрунтовими характеристиками, прямо чи опосередковано пов'язаними з гранулометричним складом ґрунтів чи вмістом у них органічної речовини.

Топографічне ускладнення рельєфу призводить до зниження ступеня зв'язку МС з агрофізичними ґрунтовими показниками (вміст гумусу та фізичної глини). На елювіальних ділянках ландшафту значення коефіцієнтів кореляції знижується до 0,35–0,55, досягаючи від'ємних значень на акумулятивних ділянках, особливо на гідроморфних фаціях. Для розв'язання проблеми надійності такого зв'язку проводяться дослідження, пов'язані з вивченням залежності від ступеня розвитку ерозійних процесів.

Однак навіть середня сила кореляційного зв'язку дозволяє використовувати МС ґрунту при інтерполяції даних опорних ґрунтових розрізів, передусім на елювіальних

ділянках, де спостерігається корельованість з грубизною гумусованого шару, наявністю гігморфних чи галоморфних фацій. Поряд із закономірним зниженням значень МС на змитих ґрунтах це дозволяє діагностувати менш родючі території (Крулов, 2020). Спадання значень МС сягає до 30–40 %.

Також слід відзначити можливість діагностування сторонніх включень на рекультивованих територіях. На рис. 2 показано картограму об'ємної магнітної сприйнятливості такої ділянки (чорнозем звичайний слабкозмитий, Ізюмський р-н Харківської області). У даному випадку розмах значень МС становить 25–30 %, що дозволяє впевнено діагностувати ґрунтові неоднорідності. Змитим ґрунтам відповідають значення $0,42\text{--}0,46 \cdot 10^{-3}$ од. СІ, порівняно з фоном $0,54\text{--}0,59 \cdot 10^{-3}$ од. СІ.

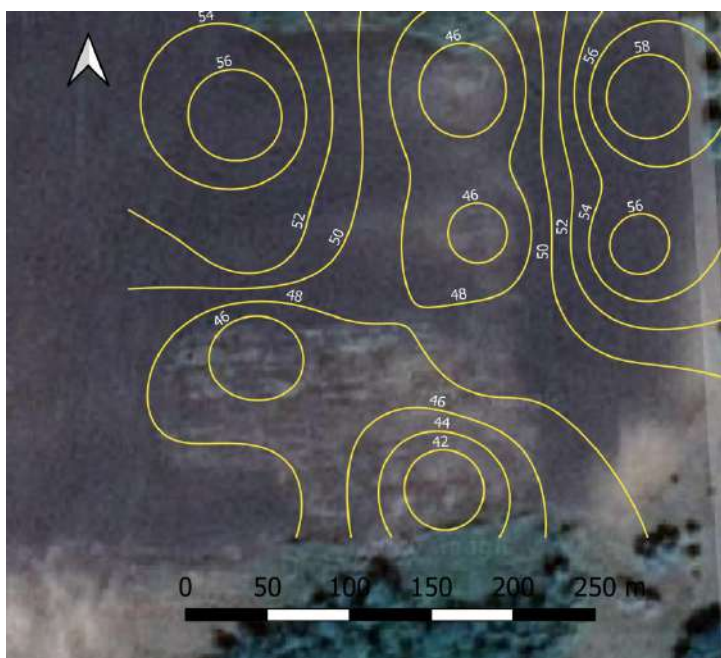


Рис. 2. Картограма магнітної сприйнятливості ґрунтів рекультивованої ділянки (розмірність МС 10^{-3} од. СІ)

Забруднення довкілля. Ще одним напрямом застосування магнітних методів є визначення забруднення довкілля, картування найбільш техногенно навантажених ділянок, ідентифікація техногенних магнітних мінералів з метою з'ясування генезису аномалій магнітних властивостей ґрунтового покриву. У роботі (Magiera et al., 2023) зазначено, що варіації мінералогічного складу, внутрішньої структури та розмірів магнітних зерен, а також стехіометрії техногенних магнітних частинок, що осідають у верхньому шарі ґрунту, можуть надати важливу інформацію, необхідну для відстеження основних джерел забруднення та розпізнавання різних технологічних процесів. В основі використання магнітного методу для картування ґрунтів урбанізованих територій лежить можливість одночасного накопичення магнітного матеріалу техногенного походження та важких металів у пилових фракціях атмосферного повітря, які у процесі своєї міграції осідають у глинистих фракціях ґрунтів (Kersten and Smedes, 2002). Наявність новоутворених магнетиків успішно може фіксуватися за допомогою вивчення петлі гістерезису, термомагнітного аналізу та різних видів залишкової намагніченості. Наприклад, для виявлення техногенного магнетиту основою є його точка Кюрі близько до 580°C та перехід Вервея в околі -150°C . Крім

того, техногенний магнетит найчастіше перебуває у мультидоменній фазі (MD), а його розміри досягають 10 мікрометрів (PM10) і більше.

Для ілюстрації розглянемо інформативність застосування магнітних методів у практиці екологічних досліджень на прикладі міста Трускавець (Menshov et al., 2020). Метою запропонованих досліджень є оцінка його загального забруднення та визначення магнітних фаз, що відповідають за зміни магнітності ґрунту, спричинених техногенними процесами. Нами було проведено площинне вивчення магнітної сприйнятливості поруч із найбільш навантаженим автомобільним трафіком місцем Трускавця – Стебницьким кільцем (рис. 3). Максимальні значення магнітної сприйнятливості зафіксовано на відстані 0–8 м від автошляху ($\chi=95\text{--}155 \cdot 10^{-8} \text{ м}^3/\text{кг}$). Із віддаленням у бік лісу на відстані 20–25 м від дороги магнітна сприйнятливість спадає ($\chi=35\text{--}25 \cdot 10^{-8} \text{ м}^3/\text{кг}$), проте ще не досягає фонових значень. Для завірки априорного припущення про техногенне забруднення ґрунтів було виміряно і розраховано коефіцієнт частотної залежності магнітної сприйнятливості. Він склав $\chi_{fd}=2\text{--}3\%$, що характерно саме для забрудненого ґрунтового покриву. Скоріше за все, це магнетит у мультидоменному стані техногенного походження.

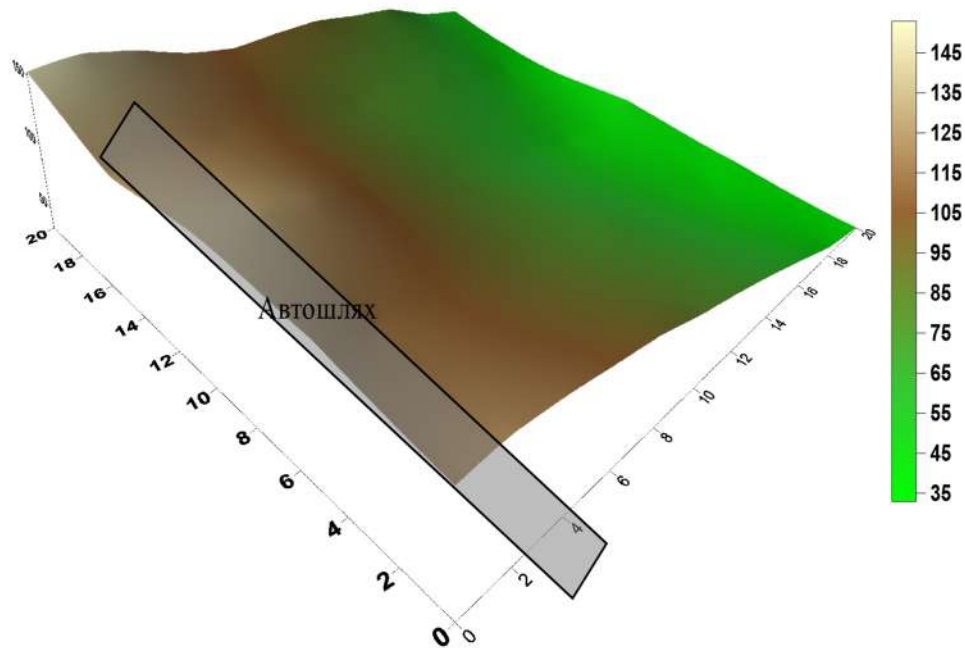


Рис. 3. Площинне вивчення магнітної сприйнятливості поруч із Стебницьким автомобільним кільцем, м. Трускавець. Осі у метрах, розмірність МС: $10^{-8} \text{ м}^3/\text{кг}$

Для ідентифікації магнітного матеріалу, що викликає описані вище екстремуми магнітної сприйнятливості, проведено термомагнітний аналіз зразків забруднених ґрунтів. Форма кривої нагрівання (рис. 4) вказує на основну магнетитову фазу із точкою Кюрі близько до 580°C . Пік кривої поруч із відміткою у 500°C може свідчити про неоформування магнетиту із домішків сульфідів заліза. На їх наявність також вказує незначний злам у кривій нагрівання біля 300°C (рис. 4а). У той же час існування переходів за температури 300°C може інтерпретуватися не лише як наявність піротинової фази, але й вмістом

невеликої кількості однодомених зерен (Yang et al., 2016). Даний факт дозволяє стверджувати, що у зразках ґрунтів присутній магнітний матеріал первинного педогенного походження, який є основним компонентом у випадку фонових незабруднених сірих-лісових, глейових ґрунтів лісової ділянки м. Трускавець.

Високоінформативним стало низькотемпературне дослідження магнітної сприйнятливості (рис. 4б). Зафіксований перехід Вервея на відмітці у -150°C ($123,15 \text{ K}$) є однозначним підтвердженням превалювання магнетиту як основного магнетика забруднених ґрунтів м. Трускавець.

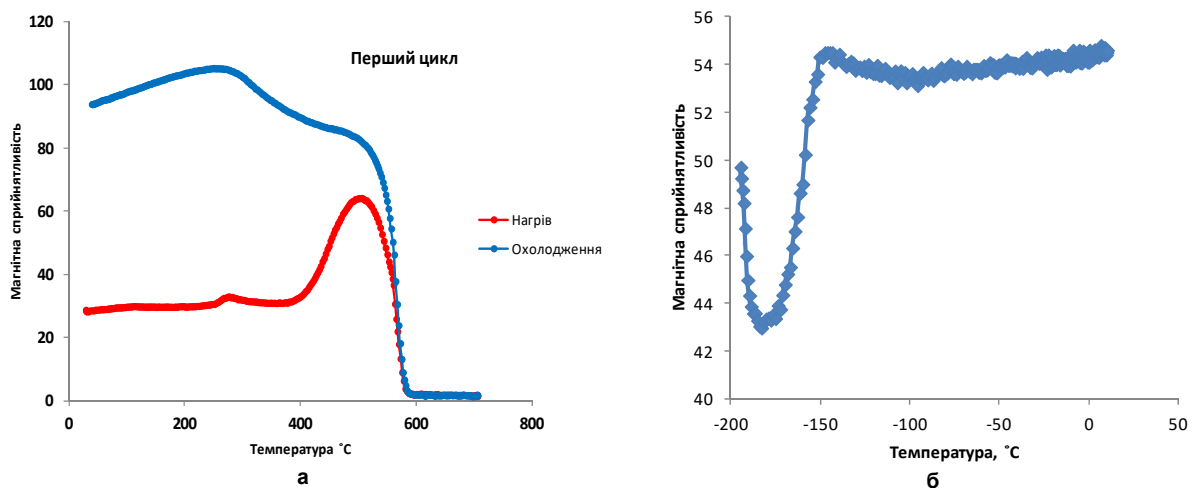
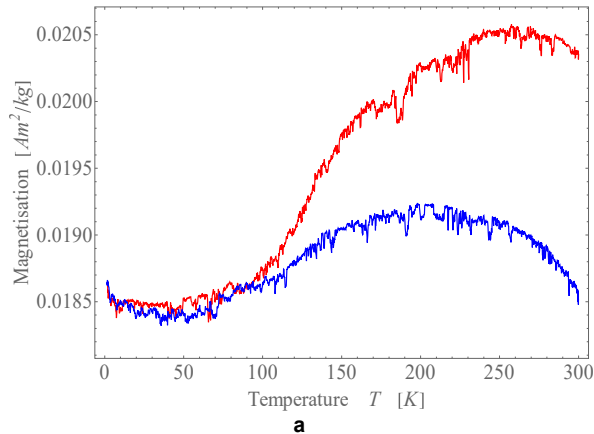


Рис. 4. Результати термомагнітного аналізу забруднених ґрунтів м. Трускавець: а – високотемпературний, б – низькотемпературний аналіз. Розмірність МС: $10^{-8} \text{ м}^3/\text{кг}$

Температурні дослідження змін магнітної сприйнятливості є доволі складними з погляду інтерпретації отриманих результатів за рахунок існування фазових переходів магнетиків під час їх нагрівання чи охолодження. Тому для підвищення однозначності інтерпретації результатів було проведено серію вимірювань температурних змін залишкової намагніченості за допомогою магнітометричної

системи Quantum Design's MPMS 3. На рис. 5 наведено криві охолодження (ZFC) та нагріву (ZFW) зразка забрудненого ґрунту Трускавця у нульовому магнітному полі. Залишкова намагніченість отримана у полі напруженості 7 Тл (1 RM7T) при кімнатній температурі. Для обмеження впливу магнітов'язких зерен час між намагнічуванням зразка та охолодженням складав 1 годину. Отже,

термомагнітний аналіз IRM7T реалізовувався у безперервному режимі за швидкості охолодження/нагрівання 5 K/хв (1800 точок на кривій). У результаті отримані криві ZFC і ZFW включають багато стороннього шуму, що ускладнює ідентифікацію переходів Вервея та Моріна. Тому було обчислено першу похідну різниці ZFC – ZFW із використанням фільтру (рис. 5б). Із рис. 5а видно, що



криві нагріву та охолодження розходяться на позначці близько 90 K. При цьому залишкова намагніченість після циклу охолодження нижча за початкову. Незважаючи на численні піки, що добре видні на рис. 5б, глобальний максимум ідентифікований за 127 K, що є близьким до переходу Вервея (110–125 K) та ізотропної точки магнетиту (130 K) (Özdemir and Dunlop, 1999).

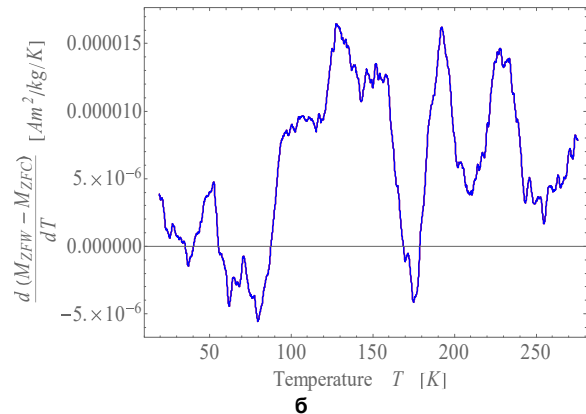


Рис. 5. Температурний аналіз залишкової намагніченості забрудненого ґрунту Трускавця: а – криві нагріву ZFW (синя) та охолодження ZFC (червона), б – перша похідна різниці ZFC – ZFW

Дані характеристики показують, що зразок включає головним чином багатодомений (MD) магнетит. Це підтверджується крутим нахилом кривої у діапазоні переходу Вервея. Крім того, IRM7T є нижчою після переходу через ізотропну точку. Це явище пов'язане з руйнуванням слабкозакріплених доменних стінок (Özdemir and Dunlop, 1999). Жодних різких змін величини залишкової намагніченості не ідентифіковано в околі ізотропної точки, що можна пояснити ступенем окиснення. Отже можна вважати, що зразок може містити і маггеміт. Таке припущення робилося нами й вище для термомагнітного аналізу магнітної сприйнятливості. Доказів наявності інших магнітних фаз (наприклад, гематиту) не виявлено.

Пошуки вуглеводнів. На даному етапі нами накопичений значущий досвід, що підтверджується теоретичними розробками та практичними матеріалами, який вказує, що пошуки покладів нафти та газу можуть бути значно інтенсифіковані та здешевлені за рахунок використання магніторозвідки у комбінації з магнітними дослідженнями гірських порід та ґрунтів. Водночас важливою є необхідність чіткого розуміння механізму новоутворення магнітних мінералів у процесі міграції вуглеводнів. Передовий міжнародний досвід вказує на важливість комплексування геофізичних, ГІС та геохімічних методів. Зокрема, за даними (De la Rosa et al., 2021), раціональним є комплекс, який об'єднує спектральний аналіз супутникових зображень, магнітні та геохімічні вимірювання гірських порід та ґрунтів (магнітна сприйнятливість, ізоермічна залишкова намагніченість насичення, аналіз кривих гістерезису, спектро-радіометрія поглинання та рентгенівський дифракційний аналіз).

Магнітні властивості ґрунтів часто є вищими (буває і навпаки) від підстильних формацій. Тому слід розрізняти магнітний сигнал від ґрунтів, що пов'язується з безпосереднім впливом флюїду, та магнітний сигнал, сформований природним (педогенним) магнетизмом ґрунтів. Для глибокого розуміння фізико-хімічних процесів, які ведуть до зміни магнітної мінералогії гірських порід та ґрунтів у зоні впливу вуглеводнів, побудовані детальні моделі на атомарно-молекулярному рівні (Menshov et al., 2015).

Визначальним є факт унікальності магнітного методу, оскільки для його застосування не має значення власне генезис покладу (нетрадиційного типу чи класичне родовище). Отже, магнітні методи у дослідженні території залягання ущільнених колекторів нафти і газу, ґрунтового покриву та верхньої частини геологічного розрізу можуть використовувати фізико-хімічні основи та існуючі набірки щодо класичних покладів нафти і газу.

Таким чином, магнітні дослідження педосфери при пошуках нафти і газу включають два напрями. Перший – це прямопошуковий метод, пов'язаний із вивченням безпосередніх змін магнітних властивостей ґрунтів та нижчезалягаючих порід під впливом міграції вуглеводнів. Другий – це врахування ґрунтових та ландшафтних аномалій для розрізнення аномального сигналу від ґрунтів та інших джерел (розломи, балки та інші геологічні глибозалягаючі структури) під час магніторозвідки на нафту і газ.

Як приклад для ілюстрації результатів наших досліджень звернемося до вивчення ділянки покладів вуглеводнів біля селища Балабанівка Богодухівського району Харківської області (більш детально див. Menshov, 2022). Досліджувалась колекція зразків ґрунту, що представлена чорноземами глибокими середньогумусними, які відбиралися у межах ареалів впливу свердловин Недільна-1 (продуктивна) та Недільна-2 (непродуктивна). У лабораторних умовах визначено питому магнітну сприйнятливості та її частотну залежність. Паралельно відбувалися дослідження атмогеохімічним методом фахівцями Інституту геологічних наук НАН "України" (І.Д. Багрій). Зокрема, визначено вміст гексану. Карту розподілу магнітної сприйнятливості ґрунтів із використанням методу інтерполяції IDW у середовищі ArcGIS наведено на рис. 6. На рис. 7 наводиться карта розподілу гексану для тих самих точок дослідження.

Як видно з рисунків 6 та 7 закономірності просторового розподілу значень магнітної сприйнятливості та вмісту гексану мають ряд спільних рис. Так, у західній частині відзначаються області збігів підвищених значень магнітної сприйнятливості та понижених значень вмісту гексану. Поруч із продуктивною свердловиною

Недільна-1 зафіксовано підвищені значення МС, а в околі непродуктивної Недільна-2 значення МС є середніми за величиною. Для вмісту гексану біля обох свердловин фіксуються максимуми.

Кореляційний аналіз показників МС та вмісту гексану у ґрунтах показав наявність середнього від'ємного зв'язку: $R = -0,4$ ($n=28$, $p>0,05$, $r\geq 0,3233$). Такі дані є значущими за зазначеної достовірності та обсягу вибірки (Fisher and Frank, 1961).

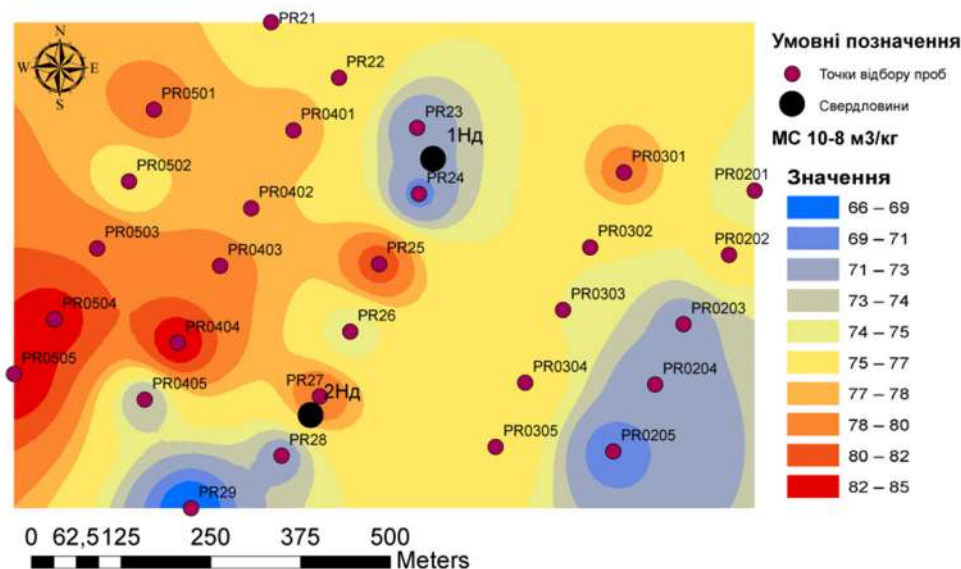


Рис. 6. Карта розподілу магнітної сприйнятливості ґрунтів

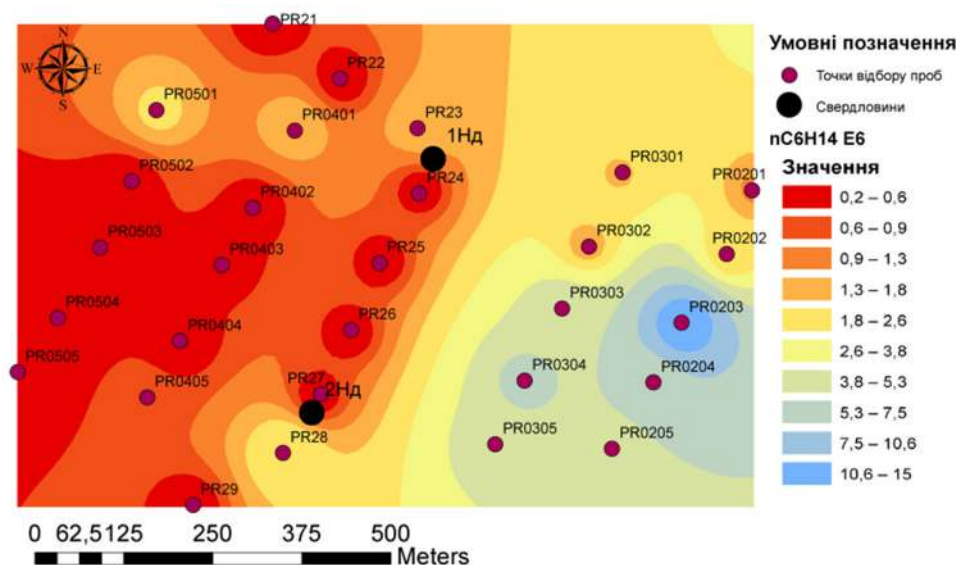


Рис. 7. Карта розподілу вмісту гексану у ґрунтах

Загальна картина розсіювання гексану у зразках ґрунтів, як і розподіли магнітної сприйнятливості, є доволі складною для інтерпретації. Пояснюється це фізико-хімічними особливостями міграції вуглеводневого флюїду у верхні горизонти геологічного розрізу та ґрунтового покриву. Водночас слід враховувати гало (haloe) ефект, природний магнетизм ґрунтів, ландшафтні особливості та геологічну будову території. Феромагнітні мінерали гірських порід та ґрунтів за межами зони покладу меншою мірою піддаються хімічному впливу і зберігаються в первісному вигляді. Такі епігенетичні перетворення приводять до перерозподілу намагніченості природних об'єктів у склепінні структури і на її флангах, що створює сприятливі передумови для відображення у магнітному полі (Безукладнов и Мавричев, 1997). У

даному прикладі аналізується зв'язок магнітної сприйнятливості із гексаном С6Н14. Відомо (Баєрій та ін., 2013), що вуглеводні С5-С8 і важчі гомологи типові тільки для нафти, але їх міграційні можливості обмежені у зв'язку з великою молекулярною вагою. Раніше вважалося, що вони можуть зустрічатися тільки в районах з інтенсивною вертикальною міграцією зонами тектонічних порушень. Проте, за більш новими даними (Исаев и др., 2009), під час геохімічних досліджень Західносибірської плити успішну розвідку покладів вуглеводнів без буріння було проведено на основі аналізу аномалій важких С10-С14 ароматичних вуглеводнів, а не як раніше за аномаліями вуглеводневих та інших газів або за складом важких алканових вуглеводнів. Результати дослідження виявили кільцеві зони аномалій концентрацій важких вуглеводнів,

які збігаються у латеральному напрямку із положенням водно-нафтового контакту нафтових покладів. Отже, важкі вуглеводні утворюють стійкі аномальні зони концентрації у приповерхневих відкладах та ґрунтовому покриві, які пов'язані із продуктивними пластами нафти і газу, і як підтверджує наведений нами приклад, можуть фіксуватися магнітними методами. Вуглеводні та продукти їх окиснення мають значну міграційну рухливість, що призводить до формування аутогенних магнітних мінералів від зони власне покладу до ґрунтового покриву, що проявляється у вигляді аномальних значень магнітної сприйнятливості, залишкової намагніченості та інших магнітних параметрів.

Археологічні дослідження. Ґрунтовий покрив є тим субстратом, на якому живе людина, веде господарську діяльність і розвиває свою культуру протягом тисячоліть свого існування. Ґрунт зберігає в собі матеріальні сліди розвитку людства, які, у свою чергу, впливають на його фізичні властивості і фізико-хімічні показники. Відзначається (Grison et al., 2022), що геофізичні методи можуть неінвазивним способом виявити структури та об'єкти, пов'язані з минулими поселеннями, а вимірювання магнітної сприйнятливості є важливим для ідентифікації археологічних об'єктів у межах високомагнітних ділянок для розрізнення природних і антропогенних факторів. Останні 15 років у Київському університеті проводяться дослідження з виявлення археологічних об'єктів і картування пам'яток за допомогою неруйнівних геофізичних методів, а також здійснюються дослідно-методичні розробки щодо створення і удосконалення археолого-геофізичних технологій. Наразі раціональний комплекс польових методів включає високоточну магнітометрію, томографію електричного опору (ТЕО) та георадіолокацію (георадарне сканування).

Кожен із методів чутливий до змін певної фізичної властивості ґрунтового середовища, яке перебувало під антропогенним впливом у минулому. Зокрема, застосування вогню призводить до зростання намагніченості речей і об'єктів, виготовлених з глини, ґрунту або вирізаних у лесоподібному суглинку – типовій материковій породі на давніх поселеннях, городищах і могильниках в українському лісостепі. На рис. 8 представлено карту магнітних аномалій виробничої частини поселення черняхівської культури Війтенки, що на Харківщині. Археологічні дослідження показали, що яскраві позитивні аномалії, які мають форму округлих плям з негативним "гало" з північного боку, спричинені гончарними горнами. Як бачимо, магнітний метод незамінний при археологічному картуванні поселень, де, таким чином, знаходять пічки, горни, обпалені житла, скупчення кераміки тощо.

Не менш важливим є інший механізм формування магнітних аномалій – шляхом поступового заповнення або затікання ґрунтом негативних форм рельєфу, вирізаних у материк (земляних жител, ровів, ям тощо). До прикладу, за цим механізмом утворилися характерні аномалії на місцях курганів скіфського часу. Наразі навіть повністю знівельовані кургани впевнено визначаються у просторі завдяки аномаліям від кільцевих ровів і досить часто – пограбованих поховальних катакомб. На рис. 9 представлено фрагменти магнітної карти курганного могильника Катеринівка з курганами різних розмірів.

За 15 років виконано високоточні магнітні знімання на п'яти десятках пам'яток, застосовувавши для цього сучасні цезієві магнітометри. Нами розроблена спеціалізована методика польових магнітометричних досліджень археологічних пам'яток та оригінальне програмне забезпечення

для обробки та інтерпретації даних вимірювань (Бондар та ін., 2019).

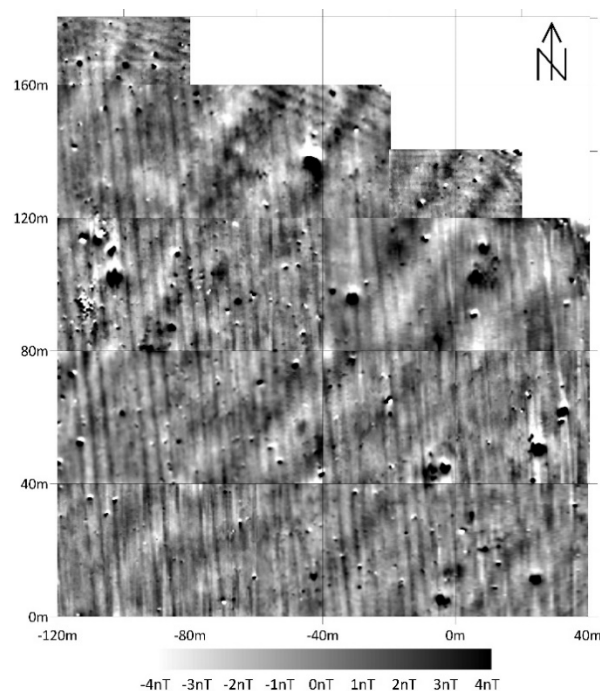


Рис. 8. Карта магнітних аномалій поселення пізньоримського часу Війтенки (Харківська обл.) (Bondar and Liubichev, 2014)

Важливою фізичною властивістю середовища є питомий електричний опір, за яким у товщі ґрунту впевнено виявляються кам'яні споруди і різні порожнини, опір яких суттєво вищий за ґрунти, або навпаки – зволожені ділянки, де опір спадає. У 2011–2012 рр. було розроблено устаткування для електророзвідки методом ТЕО на постійному струмі для дослідження вертикальної структури культурних шарів (Хоменко та ін., 2013). Прикладом застосування цієї установки є археолого-геофізична модель кургану Новоселицька могила (Полтавська обл.), у структурі якого виявлено два ймовірно різночасові насипи та за високоомними аномаліями передбачається, що це поховання у кам'яних скринях (рис. 10).

Десять років тому ми розпочали застосування георадарних технологій з використанням георадарів серії VIY українського виробника Transient technologies. Вивчення ефективності роботи цих приладів на різних типах ґрунтів дозволило окреслити коло завдань, які успішно вирішуються в українському степу і лісостепу на лесоподібних суглинках і супісках, а також дозволили суттєво просунутись у неінвазивних обстеженнях архітектурних споруд. Зокрема, на рис. 11 представлено радарограми з ділянки у Митрополичому саду Києво-Печерської лаври. Профілі перетинають старі розкопи, порушені зони, комунікації та археологічні об'єкти XII ст., інтерпретація яких підтверджена розкопками.

Крім того, у рамках георадарних проєктів проводяться дослідження геологічної будови природно-культурних ландшафтів, зокрема карстових печер (Bondar et al., 2021), вивчаються фізичні властивості ґрунтів та печерних відкладів, іде робота над проблемою комплексування геофізичних методів для отримання різномасштабної інформації на складнобудованих багатопочаткових пам'ятках (Бондар та ін., 2022). Всі дослідження на об'єктах історико-культурної спадщини

проводяться в активній співпраці з археологами та істориками з Інституту археології НАН України, Інституту історії НАН України, ДП "Рятівна археологічна служба", історико-культурними заповідниками та музеями в різних областях України. Археолого-геофізична наукова

група здійснила серію проєктів, які мали широкий суспільний резонанс, таких як пошуки поховання Б. Хмельницького в Суботіві, дослідження масових поховань Холокосту, локалізація Мельгуновського кургану під Кропивницьким тощо.

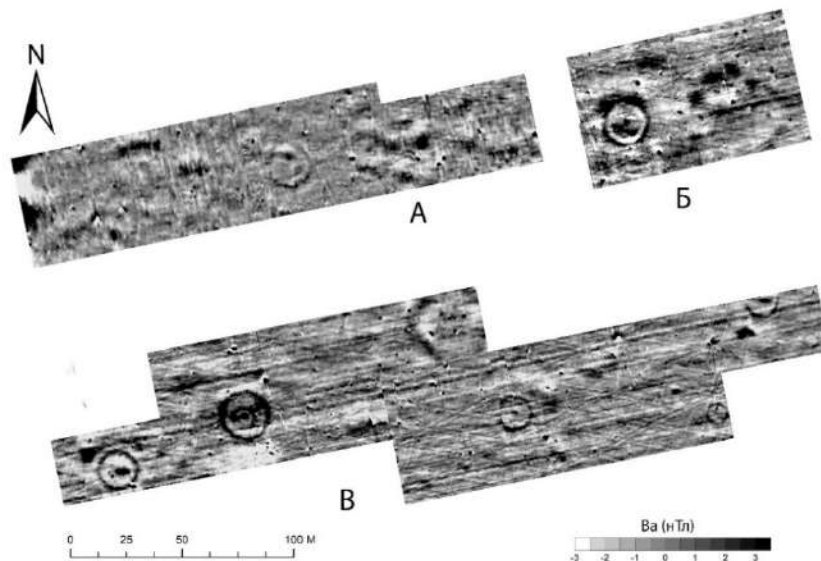


Рис. 9. Карти аномалій магнітного поля ділянок курганного могильника Катеринівка (Дніпропетровська обл.) (Бондар та ін., 2019)

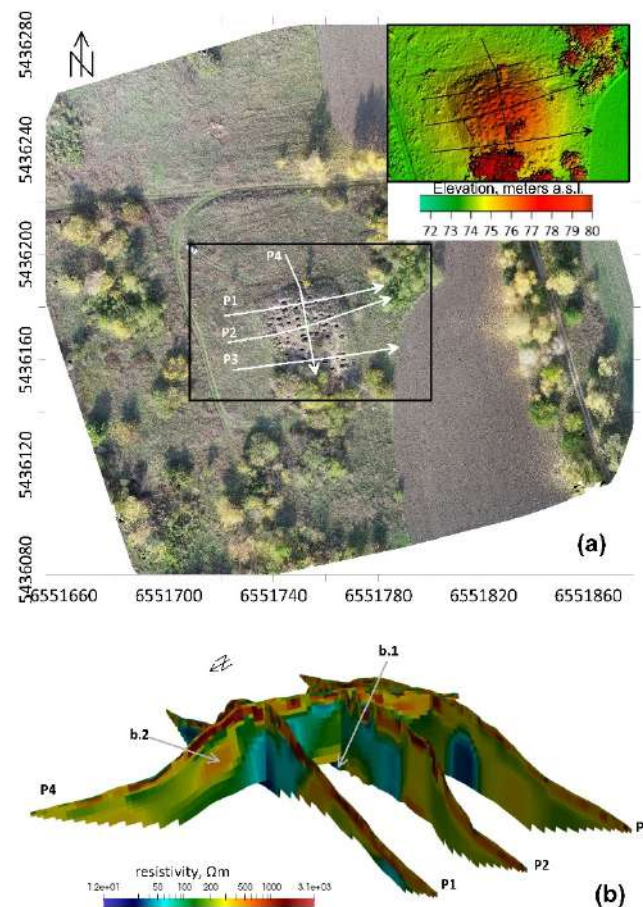


Рис. 10. Ортофотоплан, цифрова модель рельєфу (а) та геоелектрична модель кургану (б) Новоселицька могила (Полтавська обл.) доби бронзи – раннього залізного віку. Стрілки вказують на передбачувані поховання у кам'яних скринях

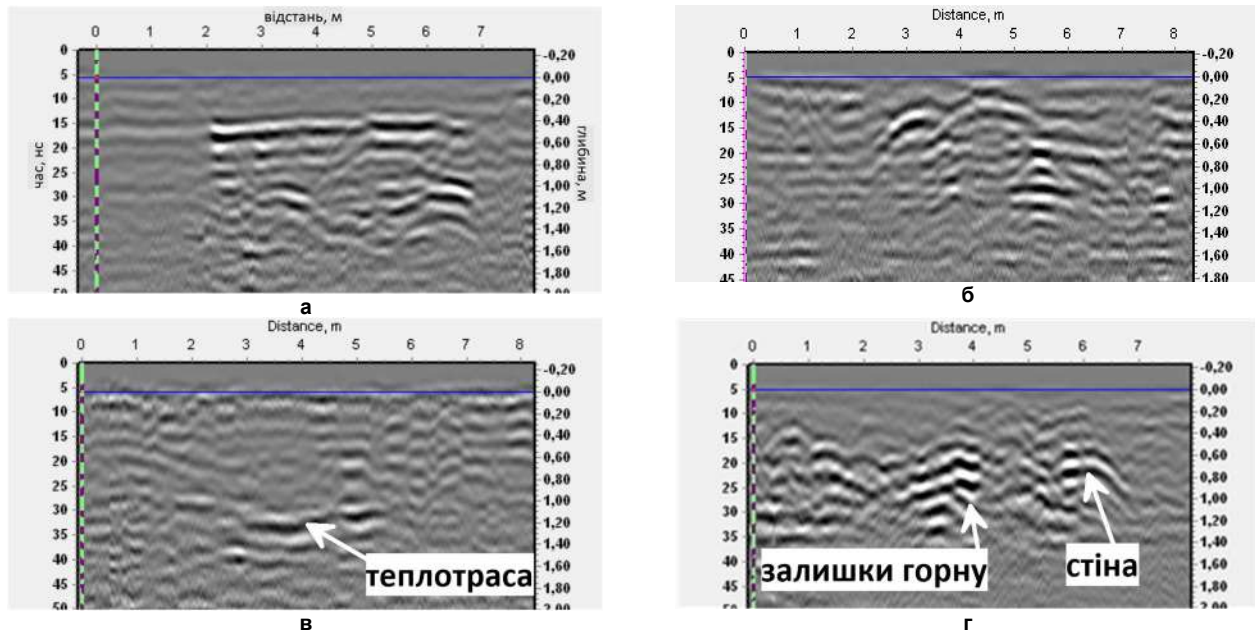


Рис. 11. Приклади радарограм, отриманих в Митрополичому саду Києво-Печерської Лаври (Bondar and Taranenko, 2021): а – аномалія від старого розкопу, законсервованого піском та ПВХ-панелями; б – кілька гіпербол від окремих кам'яних брил і фрагментів будівельного сміття; в – теплотраса; г – залишки горну та фортечного муру (стіни) XII ст.

Електрометрія та магнітометрія ґрунтового покриття. Активно проводяться дослідження ґрунтового покриття методами електрометрії та магнітометрії. Водночас використовуються як польові методи досліджень, так і вимірювання фізичних параметрів зразків ґрунтового матеріалу в лабораторних умовах. Згідно з (Carrera et al., 2022), досягнення стабільного стану ґрунтового покриття пов'язане з оптимальним вибором агрономічних процедур у межах конкретної ділянки. Також пропонується застосування методів електротомографії (ERT) та електромагнітної індукції (EMI) для моніторингу впливу традиційних і консервативних агрономічних методів оцінки стану родючих земель.

Розглянемо приклади власних досліджень для території України. Електрометричні дослідження реалізовано на методі опору на постійному та змінному струмі. При

цьому методика враховує специфіку об'єкта досліджень. Зокрема при ВЕЗ початкові розноси вибираються з мінімальною відстанню. Відібраний значущий матеріал дозволив провести класифікацію типів ґрунтових розрізів за характером кривих ВЕЗ. Для досліджень залучено першу і єдину власну розробку електротомографічної установки в Україні. Установка працює як на постійному, так і на змінному струмах. Окрім позірної опору, вона дозволяє вимірювати поляризованість ґрунтового розрізу для різних глибин. Для розрахунку параметрів поляризації вимірювання виконуються на низьких частотах із записом сигналу в приймальній лінії MN та подальшою фільтрацією сигналу. Глибинність досліджень варіює від 3 м до 24 м залежно від відстані між живлячими електродними. Детальність сягає 10 см – 1 м відповідно. Приклади електричних розрізів наведено на рис. 12.

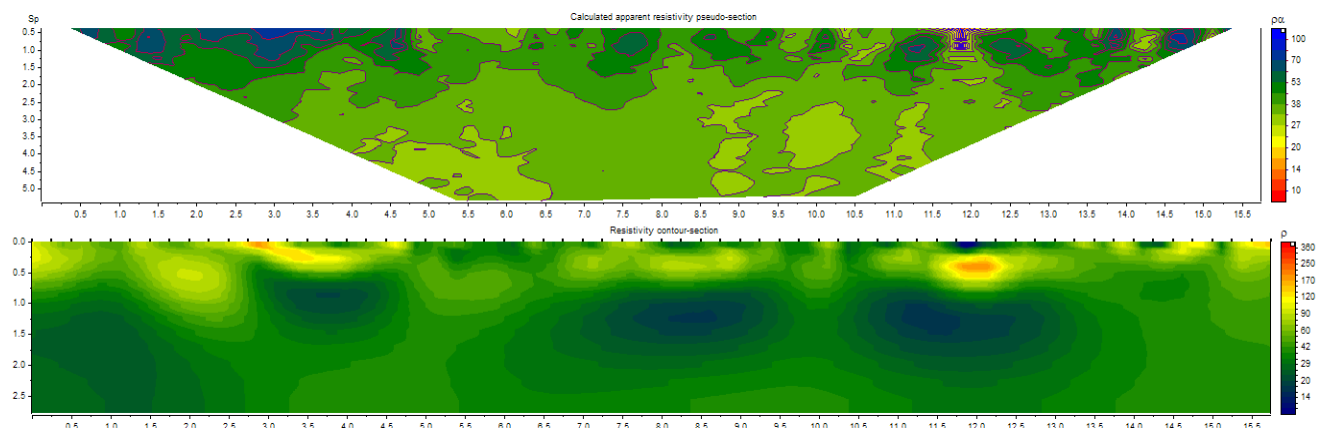


Рис. 12. Результати електротомографічних досліджень території кладовища м. Новомиргород

використання магнітометричних досліджень при вивченні природних об'єктів вимагало перегляду попередніх методичних та апаратних постулатів. Зокрема було доведено необхідність проведення ультрадетальної (крок досліджень – перші десятки см), високодискретної та

високоточної зйомки, а отже – розробки відповідної апаратури. На базі кафедри геофізики Київського національного університету імені Тараса Шевченка розроблено і впроваджено високоточні та швидкодіючі реєстратори магнітного поля (як одноканальні, так і двоканальні

варіанти). Швидкодія розроблених приладів становить 10 і більше вимірів за секунду за роздільної здатності 0,05 нТл, що є достатнім для вирішення широкого кола завдань геології, інженерної геології, археології, екології.

Особливу увагу приділено методичним дослідженням магнітного поля ґрунтового покриття. При обробці матеріалів досліджень виявлено відмінність значень магнітного поля за частотними характеристикам (рис. 13). Зокрема, фіксується зростання частотної дисперсії для ряду ґрунтів дерново-підзолисті – сірі-лісові – чорноземи. Крім того, виявлено суттєвий вплив на амплітудно-частотні характеристики магнітного поля механічної переорієнтації часток ґрунту. Це проявляється в

ускладненні характеру магнітного поля після механічної обробки території. Методичні роботи дозволили виявити дещо відмінний характер просторово-часових змін варіацій магнітного поля від загальноприйнятих, що вказує на необхідність зменшення відстані розташування магнітотваріаційної станції від ділянки досліджень.

Перспективним, на нашу думку, є вимірювання змін магнітного поля в шурфах. Зокрема порівняння проведених модельних розрахунків показує можливість альтернативного розрахунку магнітних параметрів ґрунтового розрізу у разі детального вимірювання магнітного поля у шурфах.

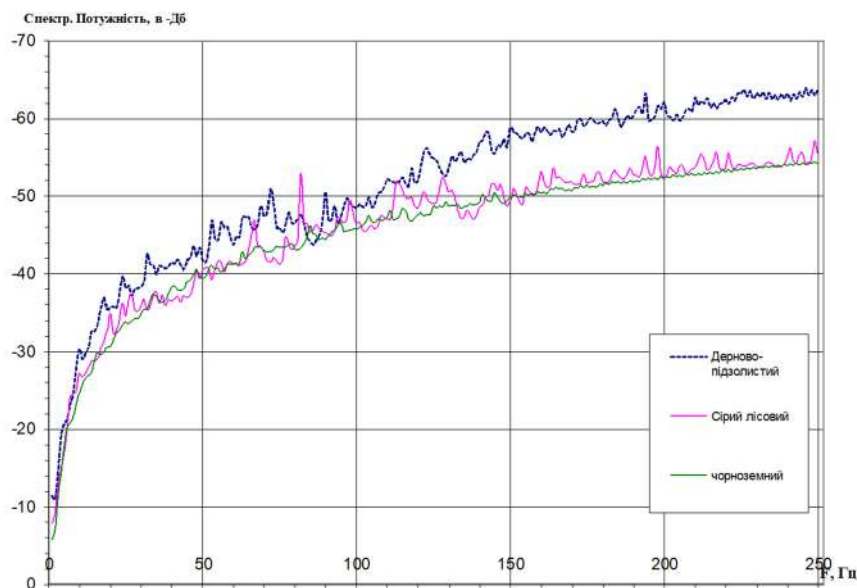


Рис. 13. Порівняльний графік осереднених спектрів магнітного поля для основних генетичних типів ґрунтів України

Висновки та перспективи розвитку. Як показують результати теоретичних розробок та практичної реалізації, педосфера є унікальним об'єктом, дослідження якого геофізичними методами надає цінну інформацію щодо ґрунотвірних процесів, антропогенного впливу в агрономії, техногенного забруднення, пошуків корисних копалин, моніторингу небезпечних геологічних процесів, дослідження археологічної спадщини. Водночас нові дані одночасно як верифікують вже існуючі теорії, так і поглиблюють ще не пізнані аспекти вивчення педосфери, ставлять нові виклики. Дослідження відбувається як на макрорівнях (аграрні поля, міські агломерації, нафтогазоносні області), так і на мікрорівні для найдрібнішого ґрунтового агрегату (педон), магнітних мінералів, магнітоактивних доменів тощо. На нашу думку, попри суттєвий доробок за останні 30 років, ми все ще перебуваємо лише на початковому етапі дослідження педосфери як об'єкта та потенціалу геофізичних методів для її розуміння як інструмента.

Перспективи розвитку геофізики педосфери пов'язані з низкою завдань. Паралельно з визначенням родючості ґрунтів важливим є визначення гальмування життєвих функцій ґрунтових агрегатів, у зв'язку із впливом гербіцидів. Наступне завдання – формування чітких критеріїв застосування геофізичних методів дослідження педосфери під час пошуків вуглеводнів. Також перспективним є дослідження змін, пов'язаних з вологістю ґрунтів, водоносними горизонтами, водною ерозією як базисом для формування зсувів. Важливими є і

фундаментальні завдання, зокрема, дослідження динаміки педосфери, чітке визначення її границь (глибина проникнення коренів рослин, перший від поверхні водонесний горизонт), глобалізація розуміння на рівні макрорландшафту. Крім того, військові дії, на жаль, відкривають цілий напрям нових завдань, що стосуються колосального зараження педосфери, втрати родючих земель та необхідності виявлення масового замінування території. Усі окреслені перспективні напрями, на нашу думку, потребують використання дешевих, експресних та технологічних геофізичних методів.

Список використаних джерел

- Багрий, І.Д., Грига, М.Ю., Войцицький, З.Я., Аксьом, С.Д., Мамишев, І.Є. (2013). Прогнозування покладів вуглеводнів на структурі Глибока за результатами структурно-термо-атмогеохімічних (стаг) досліджень. *Геологія і полезні ископаемые мирового океана*, 4(34).
- Безукладнов, В.А., Мавричев, В.Г. (1997). Выявление аномалий типа "залез" по магнитному полю. *Геология нефти и газа*, (6), 25–29.
- Бондар, К.М., Дараган, М.М., Прилуков, В., Полін, С.В., Цюпа, І.В., Діденко, С.В. (2019). Магнітометрія скіфського курганного могильника Катеринівка у Нижньому Подніпров'ї. *Геофізичний журнал*, 41, 134–152.
- Бондар, К.М., Вишва, С.А., Шейко, І.М., Козленко, Р.О. (2022). Польові методи археологічної геофізики в світі і в Україні: витоки, становлення, сучасність. *Вісник Київського національного університету імені Тараса Шевченка. Геологія*, 99(4), 12–24.
- Жадан, А., Сухорада, А., Тютюнник, Д. (1997). Магнітні властивості ґрунтів України та деякі аспекти їх інтерпретації. *Актуальні проблеми екогеології України*, 48.
- Исаев, В.И., Коржов, Ю.В., Лобова, Г.А., Ярков, Д.М. (2009). Геохимическая оценка нефтегазоносности локальных ловушек. *Геоинформатика*, (2), 54–61.
- Круглов, О.В., Коляда, В.П., Ачасова, А.О., Шевченко, М.В., Назарок, П.Г. (2020). До питання дослідження інформаційного забезпечення

створення сталих агроландшафтів. *Людина та довкілля. Проблеми неоекології*, 34, 184–193.

Круглов, О.В. (2020). Магнітометрія ґрунтів у діагностуванні деградаційних процесів. *Агрохімія і ґрунтознавство. Міжвід. тем. наук.* 36., 90, 29–35. doi: <https://doi.org/10.31073/acss90-03>

Меньшов, О.І., Сухорада, А.В., Хоменко, Р.В., Круглов, О.В. (2012). Сучасні магнітні дослідження природних об'єктів. Інформаційний аспект. *Теоретичні та прикладні аспекти геоінформатики*, 9, 178–185.

Меньшов, О., Сухорада, А. (2017). Основи теорії та методології геофізики ґрунтового покриву: перші результати практичного застосування. *Вісник Київського національного університету імені Тараса Шевченка. Геологія*, 79(4), 35–39.

Сухорада, А.В., Круглов, О.В., Жадан, А.М., Меньшов О.І. (2000). Попередні результати дослідження педомагнітних особливостей ґрунтового покриву державного агрогеофізичного полігону. *Матеріали міжнародної наукової конференції "Геофізичний моніторинг небезпечних геологічних процесів та екологічного стану середовища"*, 57–58.

Сухорада, А.В. (2002). Конверсія прикладної геофізики та її "екологізація" – навчально-методичні аспекти. *Вісник Київського національного університету імені Тараса Шевченка. Геологія*, 23–24, 32–34.

Сухорада, А.В., Гузій, М.І. (2003). Магнітометрія в агрогеофізиці. *Вісник Київського національного університету імені Тараса Шевченка. Геологія*, 26–27, 27–28.

Хоменко, Р., Бондар, К., Попов, С. (2013). Нова малоглибинна багатоелектродна установка вимірювання електричного опору. *Вісник Київського національного університету імені Тараса Шевченка. Геологія*, 2(61), 36–40.

Abd-Elmabod, S.K., Jordán, A., Fleskens, L., Van der Ploeg, P., Muñoz-Rojas, M., Anaya-Romero, M., Van der Salm, R.J., De la Rosa, D. (2015). Modelling agricultural suitability along soil transects under current conditions and improved scenario of soil factors. *Geophysical Research Abstracts*, 17, EGU2015-1012-2.

Bondar, K., Taranenko, S. (2012). The effectiveness of ground-penetrating radar surveys on the territory of Kyiv-Pechersk Lavra. Conference *Proceedings of XV International Scientific Conference "Monitoring of Geological Processes and Ecological Condition of the Environment"*.

Bondar, K., Liubitchev, M. (2014). Magnetic prospecting of Late-Roman time – beginning of the Great Migration Period settlement and cemetery Vojtenki (Eastern Ukraine). *Abstracts of 20-th annual meeting of European Association of Archaeologists, Istanbul, Turkey, 10-14 September 2014*, 189.

Bondar, K.M., Sokhatskyi, M.P., Chernov, A., Popko, Ya., Petrokushyn, O., Baryshnikova, M., Khomenko, R., Boyko, M. (2021). Geophysical assessment of Verteba Cave Eneolithic site, Ukraine. *Geoarchaeology*, 36, 238–251.

Carrera, A., Longo, M., Piccoli, I., Mary, B., Cassiani, G., & Morari, F. (2022). Electro-Magnetic Geophysical Dynamics under Conservation and Conventional Farming. *Remote Sensing*, 14(24), 6243.

De la Rosa, R., Aldana, M., Costanzo-Alvarez, V., Yopez, 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.

Grisson, H., Klanica, R., Stejskalová, Š., Šteffl, J. (2022). Geoelectric, magnetic susceptibility, and geochemical survey as a tool to clarify the origin of Bronze Age water reservoirs at the Štěpánov hillfort, Czechia. *CATENA*, 213, 106192.

Kersten, M., Smedes, F. (2002). Normalization procedures for sediment contaminants in spatial and temporal trend monitoring. *Journal of Environmental Monitoring*, 4(1), 109–115.

Magiera, T., Górka-Kostrubiec, B., Szumiata, T., Bućko, M. S. (2023). Technogenic magnetic particles in topsoil: Characteristic features for different emission sources. *Science of The Total Environment*, 865, 161186.

Mello, D.C.D. (2020). Geophysics techniques on the evaluation of natural processes in the pedosphere, at different pedoenvironment and its contribution for digital soil mapping. *Thesis ... Dr. Sci.*, Universidade de São Paulo.

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., Spassov, S., Camps, P., Vyzhva, S., Pereira, P., Pastushenko, T., Demidov, V. (2020). Soil and dust magnetism in semi-urban area Truskavets, Ukraine. *Environmental Earth Sciences*, 79(8), 182.

Menshov O. (2022). Magnetic mineralogical analysis of soils as a part of the integrated geological and geophysical model for the hydrocarbon prospecting. *Visnyk of Taras Shevchenko National University of Kyiv. Geology*, 97, 2, 39–43.

Özdemir, Ö., Dunlop, D.J. (1999). Low-temperature properties of a single crystal of magnetite oriented along principal magnetic axes. *Earth and planetary science letters*, 165(2), 229–239.

Pavlu, L., Kodešová, R., Vašát, R., Fér, M., Klement, A., Nikodem, A., Kapička, A. (2022). Estimation of the stability of topsoil aggregates in areas affected by water erosion using selected soil and terrain properties. *Soil and Tillage Research*, 219, 105348.

Yang, P., Byrne, J.M., Li, H., Shao, H.B. (2016). Evaluation of semi-arid arable soil heavy metal pollution by magnetic susceptibility in the Linfen basin of China. *Arid Land Research and Management*, 30(3), 258–268.

References

Abd-Elmabod, S.K., Jordán, A., Fleskens, L., Van der Ploeg, P., Muñoz-Rojas, M., Anaya-Romero, M., Van der Salm, R.J., De la Rosa, D. (2015). Modelling agricultural suitability along soil transects under current conditions and improved scenario of soil factors. *Geophysical Research Abstracts*, 17, EGU2015-1012-2.

Bagriy, I.D., Griga, M.Yu., Voytitsky, Z.Ya., Aksyom, S.D., Mamyshev, I.E. (2013). Prediction of hydrocarbon deposits on the Hlybok structure based on the results of structural-thermo-atmogeochimical (stag) studies. *Geology and minerals of the world ocean*, 4(34). [In Ukrainian]

Bezukladnov, V. A., Mavrychev, V. G. (1997). Detection of anomalies of the "depend" type on the magnetic field. *Geology of oil and gas*, (6), 25–29. [In Russian]

Bondar, K., Taranenko, S. (2012). The effectiveness of ground-penetrating radar surveys on the territory of Kyiv-Pechersk Lavra. Conference *Proceedings of XV International Scientific Conference "Monitoring of Geological Processes and Ecological Condition of the Environment"*.

Bondar K., Liubitchev M. (2014). Magnetic prospecting of Late-Roman time – beginning of the Great Migration Period settlement and cemetery Vojtenki (Eastern Ukraine). *Abstracts of 20-th annual meeting of European Association of Archaeologists, Istanbul, Turkey, 10–14 September 2014*, 189.

Bondar, K.M., Sokhatskyi, M.P., Chernov, A., Popko, Ya., Petrokushyn, O., Baryshnikova, M., Khomenko, R., Boyko, M. (2021). Geophysical assessment of Verteba Cave Eneolithic site, Ukraine. *Geoarchaeology*, 36, 238–251.

Bondar, K.M., Daragan, M.M., Prylukov, V., Polin, S.V., Tsyupa, I.B., Didenko, S.V. (2019). Magnetometry of the Scythian burial mound of Katerynivka in Nizhny Podniprova. *Geophysical Journal*, 41, 134–152. [In Ukrainian]

Bondar K.M., Vyzhva S.A., Sheyko I.M., Kozlenko R.O. (2022) Field methods of archaeological geophysics in the world and in Ukraine: origins, development, modernity. *Visnyk of Taras Shevchenko National University of Kyiv. Geology*, 99(4), 12–24. [In Ukrainian]

Carrera, A., Longo, M., Piccoli, I., Mary, B., Cassiani, G., & Morari, F. (2022). Electro-Magnetic Geophysical Dynamics under Conservation and Conventional Farming. *Remote Sensing*, 14(24), 6243.

De la Rosa, R., Aldana, M., Costanzo-Alvarez, V., Yopez, 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.

Grisson, H., Klanica, R., Stejskalová, Š., Šteffl, J. (2022). Geoelectric, magnetic susceptibility, and geochemical survey as a tool to clarify the origin of Bronze Age water reservoirs at the Štěpánov hillfort, Czechia. *CATENA*, 213, 106192.

Isaev, V.I., Korzhov, Yu.V., Lobova, G.A., Yarkov, D.M. (2009). Geochemical assessment of oil and gas capacity of local traps. *Geoinformatics*, (2), 54–61. [In Russian]

Kersten, M., Smedes, F. (2002). Normalization procedures for sediment contaminants in spatial and temporal trend monitoring. *Journal of Environmental Monitoring*, 4(1), 109–115.

Khomenko, R., Bondar, K., Popov, S. (2013). A new shallow multi-electrode installation for measuring electrical resistance. *Visnyk of Taras Shevchenko National University of Kyiv. Geology*, 2(61), 36–40. [In Ukrainian]

Kruglov, O.V., Kolyada, V.P., Achasova, A.O., Shevchenko, M.V., Nazarov, P.G. (2020). To the issue of research on information support for the creation of sustainable agrolandscapes. *Man and environment. Problems of neoecology*, 34, 184–193. [In Ukrainian]

Kruglov, O.V. (2020). Soil magnetometry in diagnosing degradation processes. *Agrochemistry and soil science*, 90, 29–35. [In Ukrainian]

Magiera, T., Górka-Kostrubiec, B., Szumiata, T., Bućko, M. S. (2023). Technogenic magnetic particles in topsoil: Characteristic features for different emission sources. *Science of The Total Environment*, 865, 161186.

Mello, D.C.D. (2020). Geophysics techniques on the evaluation of natural processes in the pedosphere, at different pedoenvironment and its contribution for digital soil mapping. *Thesis ... Dr. Sci.*, Universidade de São Paulo.

Menshov, O.I., Sukhorada, A.V., Khomenko, R.V., Kruglov, O.V. (2012). Modern magnetic studies of natural objects. Information aspect. *Theoretical and applied aspects of geoinformatics*, 9, 178–185. [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., Sukhorada, A. (2017). Basic theory and methodology of soil geophysics: the first results of application. *Visnyk of Taras Shevchenko National University of Kyiv*, 79(4), 35–39. [In Ukrainian]

Menshov, O., Spassov, S., Camps, P., Vyzhva, S., Pereira, P., Pastushenko, T., Demidov, V. (2020). Soil and dust magnetism in semi-urban area Truskavets, Ukraine. *Environmental Earth Sciences*, 79(8), 182.

Menshov O. (2022). Magnetic mineralogical analysis of soils as a part of the integrated geological and geophysical model for the hydrocarbon prospecting. *Visnyk of Taras Shevchenko National University of Kyiv. Geology*, 97, 2, 39–43.

Özdemir, Ö., Dunlop, D.J. (1999). Low-temperature properties of a single crystal of magnetite oriented along principal magnetic axes. *Earth and planetary science letters*, 165(2), 229–239.

Pavlu, L., Kodešová, R., Vašát, R., Fér, M., Klement, A., Nikodem, A., Kapička, A. (2022). Estimation of the stability of topsoil aggregates in areas

affected by water erosion using selected soil and terrain properties. *Soil and Tillage Research*, 219, 105348.

Sukhorada, A.V., Kruglov, O.V., Zhadan, A.M., Menshov O.I. (2000). Preliminary results of the study of pedomagnetic characteristics of the soil of the state agrogeophysical polygon. Conference *Proceedings of International Scientific Conference "Geophysical monitoring of dangerous geological processes and the ecological state of the environment"*, 57–58. [In Ukrainian]

Sukhorada, A.V. (2002). Conversion of applied geophysics and its "greening" – educational and methodological aspects. *Visnyk of Taras Shevchenko National University of Kyiv. Geology*, 23-24, 32–34. [In Ukrainian]

Sukhorada, A.V., Guziy, M.I. (2003). Magnetometry in agrogeophysics. *Visnyk of Taras Shevchenko National University of Kyiv. Geology*, 26–27, 27–28. [In Ukrainian]

Khomenko, R., Bondar, K., Popov, S. (2013). A new shallow multi-electrode installation for measuring electrical resistance. *Visnyk of Taras Shevchenko National University of Kyiv. Geology*, 2(61), 36–40. [In Ukrainian]

Yang, P., Byrne, J.M., Li, H., Shao, H.B. (2016). Evaluation of semi-arid arable soil heavy metal pollution by magnetic susceptibility in the Linfen basin of China. *Arid Land Research and Management*, 30(3), 258–268.

Zhadan, A., Sukhorada, A., Tyutyunnyk, D. (1997). Magnetic properties of the soils of Ukraine and some aspects of their interpretation. *Actual problems of ecogeology of Ukraine*. 48. [In Ukrainian]

Надійшла до редколегії 12.01.23

¹A. Sukhorada, PhD (Geol.), Associate Prof., University Veteran;

¹O. Menshov, Dr. Sci. (Geol.), Senior Researcher,

E-mail: menshov.o@ukr.net;

¹K. Bondar, Dr. Sci. (Geol.), Senior Researcher;

²O. Kruglov, PhD (Geol.), Senior Researcher;

¹R. Khomenko, PhD (Geol.), Assist.;

¹S. Popov, PhD (Geol.),

¹Taras Shevchenko National University of Kyiv, Institute of Geology,

90 Vasylkivska Str., Kyiv, 03022, Ukraine;

²NSC "Institute for Soil Science and Argochemistry Research n. a. O.N. Sokolovskiy",

4 Chaikovska Str., Kharkiv, Ukraine

GEOPHYSICS OF PEDOSPHERE IN KYIV UNIVERSITY

The development of studies of geophysics of pedosphere in Taras Shevchenko National University of Kyiv over the past thirty years is considered. The pedosphere is a unique and extremely informative object for the geophysical research. The physical and chemical properties of the objects within the pedosphere are related to the mineral deposits, soil science processes, anthropogenic influence during agricultural production, environmental pollution, paleogeographic processes, the history of human development as an archaeological heritage. In Ukraine, the study of soil magnetism began in the 90s of the 20th century in Kyiv University on the basis of the Student Design and Research Bureau. At the present moment, the investigation of all the initiated processes continues. The understanding of the physical foundations of the method is essential. The magnetic mineralogy of soils is investigated depending on the conditions of formation or introduction: pedogenesis, technogenesis, influence of hydrocarbons, etc. The new data at the same time verify the already existing theory, as well as deepen the not yet known aspects of the study of the pedosphere, raise new challenges to researchers. Analyses are carried out both at the macro level within agricultural fields, urban agglomerations, oil and gas-bearing regions, and at the micro level for the smallest soil aggregates (pedon), magnetic minerals, magnetoactive domains, etc. The results of magnetic, magnetometric, electrometric and ground-penetrating radar studies in various spheres of the national economy are given.

Keywords: soil, pedosphere, geophysics, magnetic susceptibility, magnetic survey, electrical methods.