

УДК 550.837:550.8.05

DOI: <http://doi.org/10.17721/1728-2713.97.08>

С. Попов, канд. геол. наук,

E-mail: 817614@ukr.net;

К. Бондар, д-р геол. наук, ст. наук. співроб.,

E-mail: ks_bondar@ukr.net;

Р. Хоменко, канд. геол. наук, асист.,

E-mail: hristianin@bigmir.net,

Київський національний університет імені Тараса Шевченка,

ННІ "Інститут геології", вул. Васильківська, 90, Київ, 03022, Україна;

М. Бондарьков, ген. директор,

E-mail: mbondarkov@chornobyl.net;

А. Максименко, зам. ген. директора,

E-mail: amaksimenko@chornobyl.net,

ДНДУ "Чорнобильський центр з проблем ядерної безпеки,

радіоактивних відходів та радіоекології" ДАЗВ України,

вул. 77-ї Гвардійської дивізії, 11, Славутич, 07101, Україна

МЕТОДИКА ГЕОФІЗИЧНОГО КАРТУВАННЯ ТА МОНІТОРИНГУ МІСЦЬ ЗАХОРОНЕННЯ РАДІОАКТИВНИХ ВІДХОДІВ

(Представлено членом редакційної колегії д-ром геол. наук, ст. наук. співроб. О. Л. Шевченком)

Захоронення радіоактивних відходів (РАВ) у Чорнобильській зоні відчуження і сьогодні містять значні об'єми матеріалів, що діляться. При цьому відомості про кількість РАВ, похованих під час аварії, не можна назвати вичерпними. У зв'язку з підсиленням міжнародних вимог до екологічної безпеки були проведені роботи з детального обстеження захоронень РАВ, створених при ліквідації аварії на Чорнобильській АЕС.

У роботі були задіяні такі неінвазивні методи геофізичних досліджень: 1) детальна магнітометрія; 2) георадарний метод; 3) томографія електричного опору на постійному струмі. Магнітометрія дозволила закартувати об'єкти та виділити найбільш імовірні місця захоронення контейнерів із речовинами, що діляться. Геоелектричні моделі показали відмінність електричного опору різних ділянок одного захоронення, що пояснюється зміною вологості і може свідчити про підтоплення. Рівень ґрунтових вод установлений за допомогою георадарного методу. У результаті інтерпретації даних геофізичних досліджень були відновлені геометричні параметри і особливості конструкції об'єкта попереднього захоронення радіоактивних відходів "Третя черга ЧАЕС", що дозволило створити його тривимірну модель і визначити місця для подальшого застосування прямих радіоактивних методів досліджень.

Ключові слова: магнітометрія, томографія електричного опору, георадарні дослідження, доза випромінювання, радіоактивні відходи, ґрунтові води.

Вступ. На території зони відчуження (ЗВ) існують об'єкти, у яких передбачається наявність матеріалів, що діляться, і до яких можливий несанкціонований доступ. Виявлення і детальне картування таких місць є важливим питанням безпеки цих об'єктів. Чорнобильським центром із проблем ядерної безпеки, радіоактивних відходів та радіоекології за підтримки Департаменту енергетики (DOE) Сполучених Штатів Америки у період 2013–2016 рр. був виконаний проєкт із пошуків та досліджень матеріалів, що діляться, у ЗВ. На підставі попереднього оцінювання для детального обстеження із залученням геофізичних методів були вибрані об'єкти попереднього захоронення радіоактивних відходів (ПЗРВ) "Третя черга ЧАЕС" (ділянка 1) та борт захоронення радіоактивних відходів (РАВ), який знаходиться в районі об'єкта "Укриття" і отримав умовну назву "Об'єкт 300 м від ОУ" (ділянка 2) (рис. 1).

Метою роботи було вивчення місць розташування будівельних конструкцій пунктів захоронення та місць локалізації залізних контейнерів із високоактивними радіоактивними відходами (РАВ). За отриманими результатами неінвазивних досліджень визначалися місця для проведення інвазивних досліджень, направлених на пошук місць розташування РАВ та вивчення їхніх характеристик (Бондарьков, 2017).

Методи досліджень. Для проведення досліджень використовувався комплекс польових геофізичних і лабораторно-аналітичних методів. Вивчення кожного об'єкта проводилося у два етапи. На першому етапі виконувалися поверхневі дослідження: геодезичне знімання, поверхневе гамма-знімання, магнітометрія, георадарні вимірювання, електрометрія. На цьому етапі визначалася конфігурація та структура об'єкта,

виявлялися окремі аномалії, які могли бути пов'язані із залізними контейнерами. На другому етапі виконувалися роботи із вторгненням у тіло поховання поблизу виявлених аномалій для визначення видів і розподілу похованих РАВ та відбору проб для лабораторних досліджень. Проводилося буріння свердловин для нейтронного і гамма-каротажу, відбір проб для лабораторних досліджень. Буріння проводилося в межах насипної частини та не порушувало залізобетонних конструкцій поховання або залізних контейнерів.

Модульні магнітометричні спостереження – вимірювання індукції геомагнітного поля – виконані цезієвими магнітометрами ПКМ-1 (Геологоразведка, РФ), датчики яких мають роздільну здатність 0,001 нТл, межа СКВ вимірювання магнітної індукції 0,01 нТл.

Магнітне знімання проводилося за стандартною методикою одним цезієвим магнітометром, другий використовувався під час вимірювань як варіаційна станція, тобто записував зміни магнітного поля в часі. У рамках планшетів знімання відстань між профілями становила 2 м, оператор-геофізик у процесі знімання рухався "змійкою". Варіаційна станція працювала з такою самою швидкістю, що і магнітометр, який використовувався для вимірювання магнітного поля ділянки досліджень – 10 вимірів/сек. У процесі обробки польової інформації врахування варіацій здійснювалося шляхом віднімання запису варіаційної станції, інтерпольованого сплайном Акімі, від вимірних значень по профілю.

Із запису вилучалась також нормальна складова поля, апроксимована лінійною регресією по профілю. Масив залишкових значень був інтерпольований до регулярної мережі 1х1 м, за яким побудовані карти аномалій індукції геомагнітного поля (Ba).



Рис. 1. Загальний вигляд території ЗВ у районі ЧАЕС із позначенням дослідних ділянок

Георадарне сканування виконано по поверхні об'єкта ПЗРВ "Третя черга ЧАЕС". Використано георадар виробництва "Transient technologies" (Україна) VIY-2-300 із центральною робочою частотою 300 МГц.

Дані отримані по мережі профілів, орієнтованих у напрямку схід-захід (рис. 2), у безперервному режимі знімання. При цьому виконано 500 замірів на трасі, часовий діапазон становив 120 нс, інтервал між трасами становив 32 мм. При обробці та інтерпретації георадарних даних переважно використано стандартний набір фільтрів програми Synchro 3 (Ivashchuk, 2019), рекомендований виробником. Обробка даних складалася із послідовних кроків: 1) закріплення нульового рівня – для правильного визначення глибини необхідно поєднати початок шкали глибин із певною точкою прямого імпульсу (напр. точкою максимальної амплітуди); 2) вейвлет-фільтрація для ефективного придушення низькочастотних електромагнітних коливачів і високочастотних шумів; 3) видалення фоновому сигналу в заданому вікні, у результаті чого від кожної траси профілю віднімається траса в обраному вікні (ширина вікна усереднення задається загальною кількістю в 300 трас); 4) підсилення сигналу – для поліпшення розпізнавання глибоких аномалій.

Вивчення геоелектричного розрізу на об'єкті ПЗРВ "Третя черга ЧАЕС" здійснювалося методом томографії електричного опору (ТЕО). Вимірювання виконані за допомогою багатоелектродного устаткування "ELIZA-1" (Хоменко та ін., 2013). Устаткування має такі основні характеристики: вимірювання здійснюються на постійному струмі; кількість електродів – 64; крок розстановки електродів – 1 м; кількість вимірювальних каналів – 1. Для визначення позірному опору використана модифікація симетричної чотириелектродної установки. З огляду на малу (до 11 м) глибини досліджень і використання багатокаскадного фільтруючого вхідного тракту запису, електрометричні вимірювання здійснювалися за низької напруги близько 40–50 В. Значення струмів у лінії АВ при цьому змінювалися із 4 до 50 мА.

Обробка даних проводилася у програмі RES2dinv, яка дозволяє реалізовувати блокові схеми розв'язання прямої та оберненої (інверсної) задачі у класі 2-D-моделей

(Loke, Barker, 1996; Loke, 2009). Для інверсії експериментальних даних обраний алгоритм Оссам-Marquardt, який здійснює комбіновану гладко-контрастну схему інверсії, засновану на використанні гаус-ньютонівського методу найменших квадратів: Оссам – інверсія з використанням згладжуючого оператора і додатковою мінімізацією контрастності, що дозволяє отримувати гладкий розподіл параметра (питомого опору ρ); Marquardt – алгоритм інверсії, що забезпечує отримання контрастної моделі розподілу параметра середовища.

Результати обстеження ПЗРВ "Третя черга ЧАЕС". Об'єкт, досліджений на ділянці 1, – це спеціально створена будівельна конструкція для захоронення РАВ, яка не була закінчена до моменту аварії. Історичні відомості про використання цієї споруди в 1986 р. свідчать про надходження РАВ безпосередньо зі зруйнованого четвертого блоку в перший період ліквідації наслідків аварії. На жаль, точних відомостей про радіонуклідний склад і активність похованих РАВ у проектно-конструкторській документації об'єкта не збереглося. Відомо, що сховище складається із семи каньйонів. Повздовжні стіни завдовжки від 90 до 140 м виконані зі збірного залізобетону. Ширина кожного каньйону становить ≈ 6 м, висота стін ≈ 5 м, торцеві стіни відсутні. Поверхневі розміри ПЗРВ 50x170 м, оціночні розміри основного тіла поховання (у межах будівельних конструкцій) 42x120 м (25 200 м³). Усе сховище законсервовано в 1988–1989 рр. шаром глини і ґрунту.

Поверхневе гамма-знімання території поховання не виявило підвищених рівнів гамма-випромінювання. При візуальному огляді поверхні об'єкта виявлено велику кількість значних суфозійних провалів консервуючого шару. Вимірювання потужності еквівалентної дози (ПЕД), виконані у провалах і поверхневих свердловинах (на глибину консервуючого шару), виявили зростання рівнів гамма-випромінювання із глибиною.

Дані магнітного знімання дозволили уточнити конструкцію сховища. Магнітні маси у сховищі розподілені нерівномірно. Найбільше чорного металу міститься у південній частині та під східною стіною (рис. 2, 3).

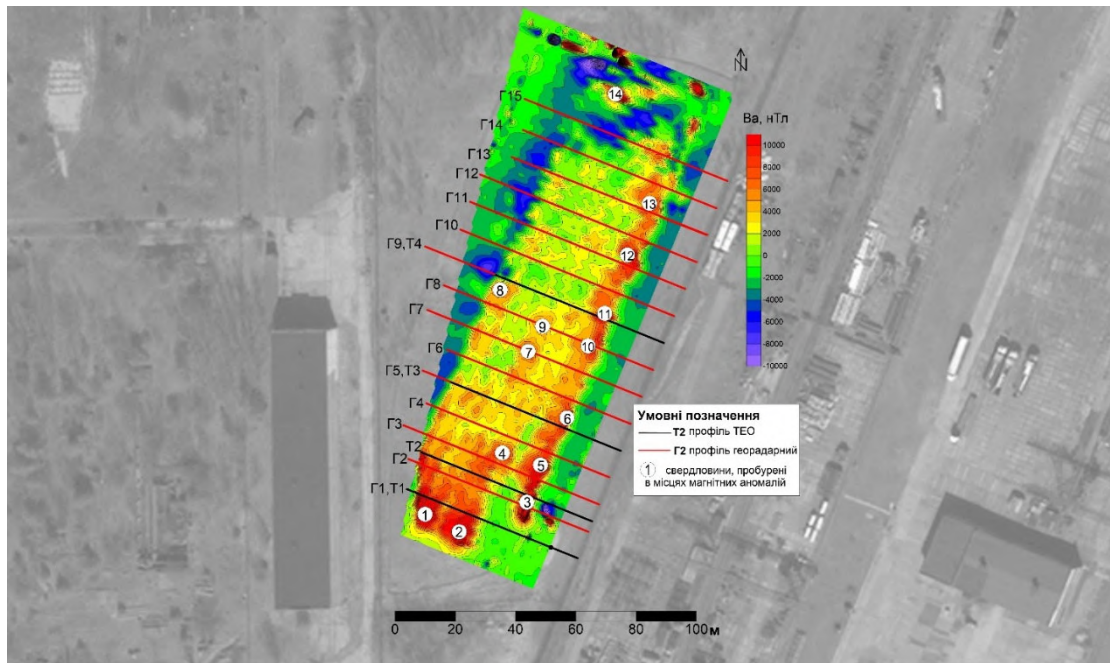


Рис. 2. Схема проведення геофізичних досліджень методами магнітометрії, томографії електричного опору та георадіолокації з позначенням місць буріння свердловин

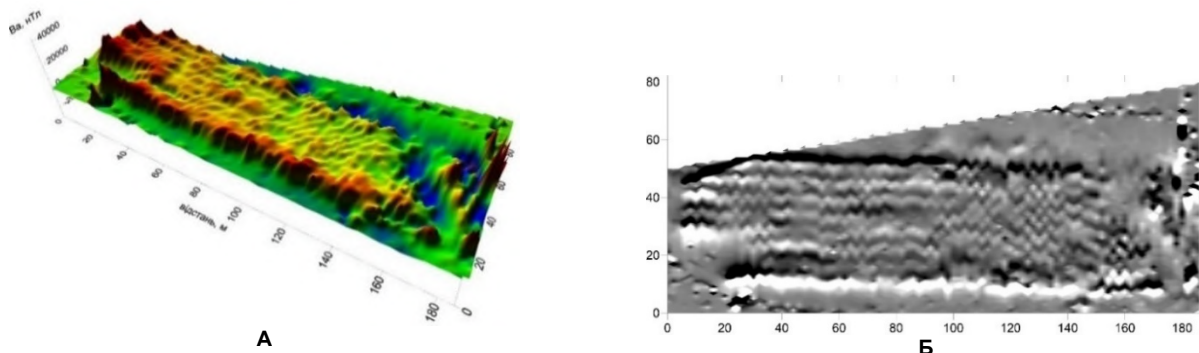


Рис. 3. ПЗРВ "Третя черга ЧАЕС". Тривимірний модель геомагнітного поля (А) та карта після застосування фільтра Shift and Difference (Б)

У структурі геомагнітного поля об'єкта (рис. 2, 3) виділяються всі сім каньйонів, однак довжина і стан стін різняться. Положення кожної зі стін вдалося встановити досить точно за стрічкоподібними аномаліями, які яскраво проявилися після застосування фільтра Shift and Difference Filter з арсеналу Golden Software Surfer 13 (рис. 3, Б). Отримана карта фактично є зображенням горизонтального градієнта B_a у напрямку захід – схід. Східна бокова стіна сховища і дві наступні за нею на 30 м коротші за інші стіни. Північною межею усієї конструкції можна вважати негативну аномалію, видовжену в напрямку захід – схід.

Більш детальну інформацію про будову ПЗРВ "Третя черга ЧАЕС" вдалося отримати з геоелектричних розрізів, отриманих методом ТЕО, а також георадарних вимірювань.

Вивчення геоелектричного розрізу на об'єкті ПЗРВ "Третя черга ЧАЕС" здійснювалося методом томографії електричного опору вздовж серії поперечних профілів, показаних на рис. 2. З масиву даних інверсії були виділені помилкові значення і точки із середньоквадратичною похибкою (СКП), що перевищує 80 %. Модель приймалася після п'яти ітерацій або менше, якщо спостерігалася повільна швидкість збіжності (менше 1 %). Оскільки питомий опір піщаного ґрунту, який до того ж

може бути суттєво зволожений, значно нижчий, ніж питомий опір бетонних конструкцій, а розріз споруди загалом може бути дуже неоднорідний, то вважаємо за можливе прийняти модель із досить високою СКП як таку, що адекватно відображає будову об'єкта.

Питомий опір бетону змінюється в межах 200–1000 Ом*м (Лесников, Паранин, 2017), наявність арматури з опором 1 мкОм*м, а також металевих контейнерів із РАВ може знижувати опір. Водночас наявність порожнин, навпаки, здатна підвищувати його. Отже, питомий опір багато в чому залежить від ступеня руйнування конструкції та характеру її заповнення.

Природно-антропогенний розріз, будову якого визначаємо за інвертованими профілями ТЕО, характеризується значеннями опору, що змінюються в межах 1–4000 Ом*м. Нижній шар усіх розрізів має опір <10 Ом*м, що однозначно свідчить про його обводнення. Рівень ґрунтових вод (РГВ) становить близько 2,3 м на плоскій ділянці зі східного боку сховища. Ця позначка РГВ підтверджується також даними георадарних вимірювань (рис. 5). Добре заізолювані бетонні конструкції характеризуються питомим опором >1000 Ом*м. Проміжні значення опору обумовлені обмеженнями чутливості методу, що не здатний розрізнити різкі границі неоднорідностей усередині ґрунтових шарів (рис. 4).

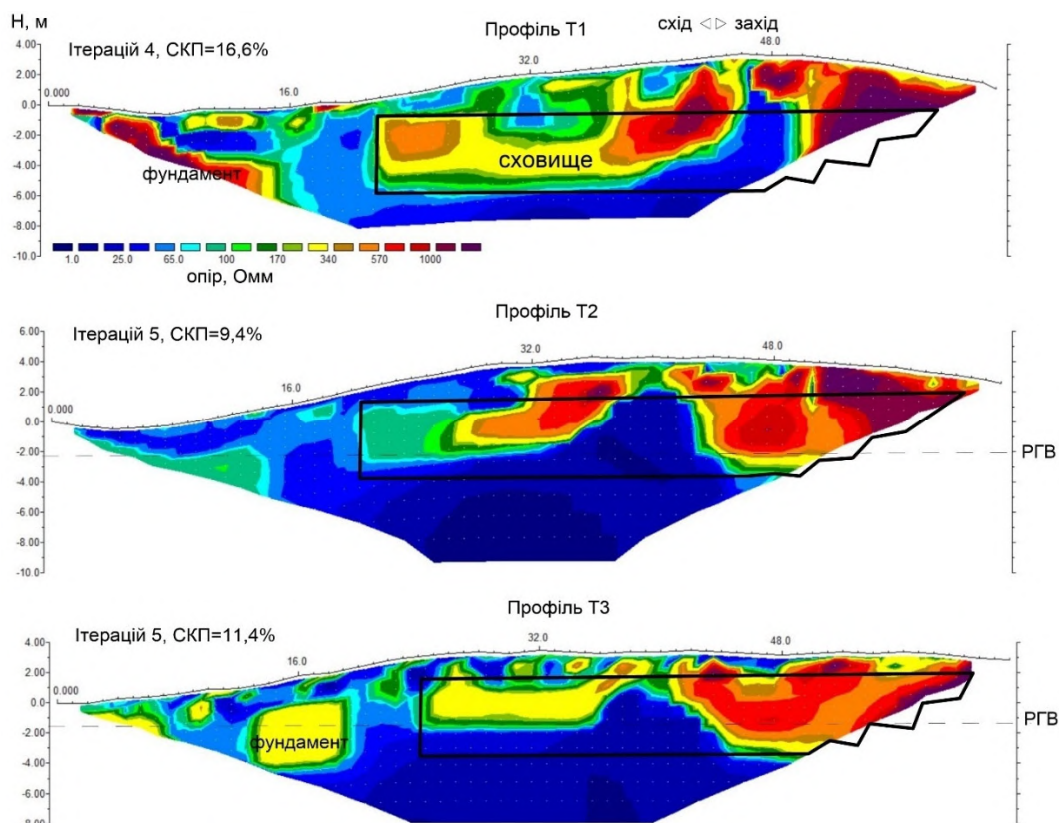


Рис. 4. ПЗРО "Третя черга ЧАЕС". Приклади геоелектричних розрізів, які перетинають сховище

Зокрема, профіль Т1 (рис. 3) перетинав пагорб сховища в напрямку зі сходу на захід. Бетонний короб конструкції, імовірно, не є монолітним. На розрізі бачимо розрив у його структурі на 47 м від початку профілю (рис. 4). Верхній шар засипки об'єкта також не є однорідним і містить уламки високоомних матеріалів (бетону?). Значення, що перевищують 1000 Ом, фіксуються у західній частині розрізу, що може свідчити про хорошу гідроізоляцію західних каньйонів сховища, а також на початку профілю, де, імовірно, зачепили фундамент іншої споруди. Високі опори двох західних каньйонів сховища можуть бути також пов'язані з їхньою засипкою високоомним бетонним сміттям. Нижній провідний шар відповідає підтопленому ґрунту.

Згідно з геоелектричними розрізами по профілях Т2 та Т3 (рис. 4) східна частина сховища, імовірно, підтоплена ґрунтовими водами. Низькоомна ділянка у районі

третього зі сходу каньйону просторово відповідає пониженим значенням індукції геомагнітного поля (рис. 3), що, можливо, свідчить про недосконалість конструкції або руйнацію підлоги сховища.

Попри великий обсяг виконаних георадарних досліджень, їх результати не виявилися інформативними через товстий шар глинистої засипки (близько 1 м), який перекриває об'єкт. Глинистий прошарок у розрізі призводить до великих втрат енергії електромагнітної хвилі – згасання сигналу. Тому ґрунт із більш ніж 35 % глини ефективно адсорбує електромагнітні хвилі, забезпечуючи малу глибину проникнення для георадарів (Daniels, 2004). Однак на ділянці поблизу об'єкта георадарне сканування дозволило встановити двошарову будову піщанистого ґрунтового розрізу, а також виявити рівень ґрунтових вод, який становить близько 2,2 м від денної поверхні у східній частині профілю Г7 (рис. 5).

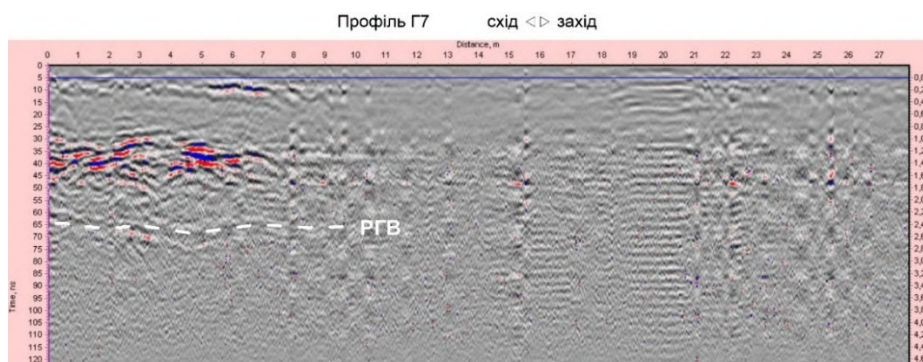


Рис. 5. ПЗРО "Третя черга ЧАЕС". Фрагмент радарограми по профілю Г7 (східна частина)

У результаті інтерпретації даних геофізичних досліджень були відновлені геометричні параметри та

особливості конструкції ПЗРО "Третя черга ЧАЕС", що дозволило створити його тривимірну модель (рис. 6).

Результати обстеження бурту "Об'єкт 300 м від ОУ" (ділянка 2 на рис. 1). Об'єкт являє собою борт заввишки до 3 м, витягнутий уздовж автодороги на ЧАЕС зі сходу на захід, завдовжки ≈ 93 м, завширшки ≈ 15 м. Поверхня бурту нерівна, південний бік круто падає до дороги; східна і північна частини – високі, із заростями молодого лісу. "Підшва" бурту міститься на позначці 107 м (позначка рівня води в р. Прип'ять 103 м). Поверхнєве гамма-знімання об'єкта не виявило значних джерел випромінювання. При магнітометричному дослідженні об'єкта виявлено низку позитивних магнітних аномалій (рис. 7), що вказує на наявність великої

кількості чорного металу. У точках із найбільш високими значеннями потужності еквівалентної дози були виконані розвідувальні свердловини.

У результаті буріння розвідувальних свердловин установлено, що для більшої частини об'єкта під шаром радіоактивно забрудненого ґрунту містився шар бетону або щебню. Максимальні значення ПЕД гамма-випромінювання спостерігалися в поверхневому шарі ґрунту на глибині від 60 см. У свердловинах, де не було виявлено бетон, підвищені значення потужності дози поширювалися на глибину до 2 м.

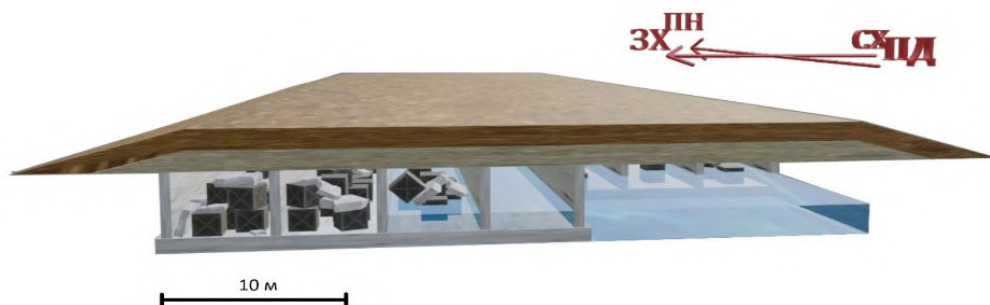


Рис. 6. ПЗРО "Третя черга ЧАЕС". Тривимірна модель

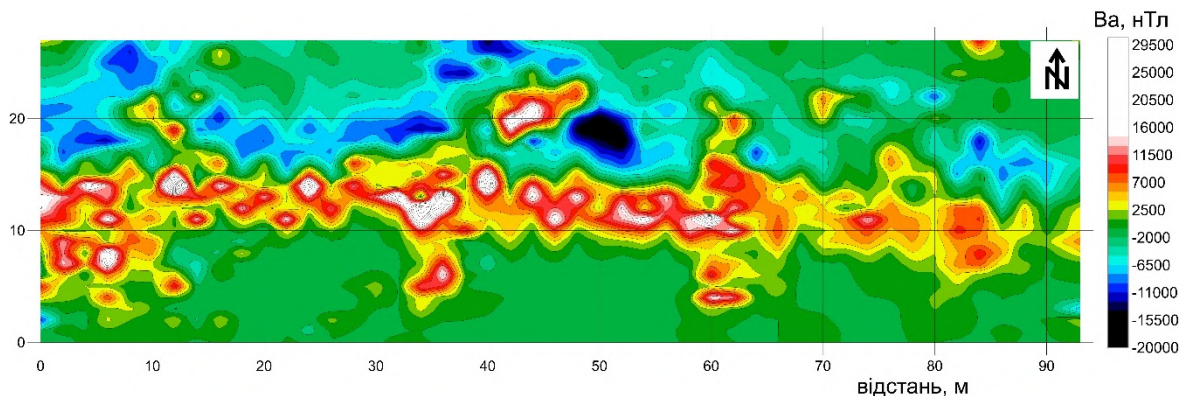


Рис. 7. Карта аномалій магнітної індукції на ділянці "Об'єкт 300 м від ОУ"

Висновки. Комплексування польових магнітометричних, електрометричних та георадарних досліджень на ПЗВР у Чорнобильській зоні відчуження дозволило відновити структуру, оцінити стан збереженості та надати обґрунтовані рекомендації для буріння з метою виявлення скупчень РАВ. Зокрема, на об'єкті ПЗВР "Третя черга ЧАЕС" за допомогою високоточної магнітометрії встановлені межі й окремі елементи конструкції сховища, виділені зони скупчень металевих контейнерів з РАВ. За даними томографії електричних опор та георадарних досліджень діагностовано часткове підтоплення об'єкта ґрунтовими водами. Знання про матеріальний склад ПЗВР та ПТЛРВ, які можливо отримати за допомогою буріння, допоможуть пояснити аномалії водневого показника (рН) та надзвичайно високого вмісту ^{90}Sr у ґрунтових водах на цих об'єктах (Matrosov et al., 2018). Магнітні дослідження "Об'єкта 300 м від ОУ" дозволили окреслити межі сховища. Цей геофізичний комплекс можна рекомендувати для діагностики стану техногенних об'єктів.

Список використаних джерел

Бондарьков, М.Д., Максименко, А.М., Осолков, Б.Я., Антропов, В.М., Мельниченко, В.П., Третьяк, О.Г. (2017). Исследования делящихся материалов в объектах захоронения радиоактивных отходов в Чернобыльской зоне отчуждения. *Проблеми безпеки атомних електростанцій і Чорнобиля*, 28, 45–54.

Лесников, Д.В., Паранин, А.В. (2017) О подходе к расчету электрического сопротивления железобетонных конструкций. *Известия Транссиба*, 3(31), 102–114.

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.

Daniels, D.J. (2004). Ground Penetrating Radar. 2nd Edition. The Institute of Electrical Engineers, London, United Kingdom.

Ivashchuk, V., Borodavka, V., Prokhorenko, V., Chu, Xin, Pavluk, A. (2019). Synchro 3. Ver.3.11.1.5. Отримано 3 http://viy.ua/download/install_VIY_SGPR.zip

Loke, M.H. (2009). Tutorial: 2-D and 3-D electrical imaging surveys.

Loke, M.H., Barker, R.D. (1996). Rapid least-squares inversion of apparent resistivity pseudosections by a quasi-Newton method. *Geophysical Prospecting*, 44, 131–152. doi:10.1111/j.1365–2478.1996.tb00142.x

Matrosov, D.T., Shevchenko, O.L., Nosovskyi, A.V., Panasiuk, M.I. (2018). Data analysis of radiation and hydroecological monitoring of ground waters located at the industrial site of Chernobyl NPP. *XII International Conference "Monitoring of Geological Processes and Ecological Condition of the Environment"*, 13–16 November 2018, Kyiv, Ukraine. *Monitoring_2018_eng.pdf*, 1–5.

Reference

Bondarkov, M.D., Maksimenko, A.M., Oskolkov, B.A., Antropov, B.M., Melnichenko, V.P., Tretiak, O.G. (2017). Investigation of fissile materials in radioactive waste disposal facilities in the Chernobyl exclusion zone. *Problems of safety of nuclear power plants and Chernobyl*, 28, 45–54. [in Russian]

Daniels, D.J. (2004). Ground Penetrating Radar, 2nd Edition. The Institute of Electrical Engineers, London, United Kingdom.

Ivashchuk, V., Borodavka, V., Prokhorenko, V., Chu, Xin, Pavluk, A. (2019). Synchro 3. Ver.3.11.1.5. Retrieved from http://viy.ua/download/install_VIY_SGPR.zip

Khomenko, R., Bondar, K., Popov, S. (2013). New high-resolution shallow-depth multi-electrode equipment for electrical resistivity tomography. *Visnyk of Taras Shevchenko National University of Kyiv. Geology*, 2(61), 36–40. [in Ukrainian]

Lesnikov, D.V., Paragin, A.V. (2017). On the approach to calculating the electrical resistance of reinforced concrete structures. *Journal of Transsib Railway Studies*, 3(31), 102–114. [in Russian]

Loke, M.H. (2009). Tutorial: 2-D and 3-D electrical imaging surveys.

Loke, M.H., Barker, R.D. (1996). Rapid least-squares inversion of apparent resistivity pseudosections by a quasi-Newton method. *Geophysical Prospecting* 44, 131–152. doi:10.1111/j.1365–2478.1996.tb00142.x

Matrosov, D.T., Shevchenko, O.L., Nosovskyi, A.V., Panasiuk, M.I. (2018). Data analysis of radiation and hydroecological monitoring of ground waters located at the industrial site of Chornobyl NPP. *XII International Conference "Monitoring of Geological Processes and Ecological Condition of the Environment", 13–16 November 2018, Kyiv, Ukraine. Monitoring_2018_eng.pdf.*, 1–5.

Надійшла до редколегії 15.07.21

S. Popov, PhD (Geol.),
E-mail: 814614@ukr.net;
K. Bondar, Dr. Sci. (Geol.), Senior Researcher,
E-mail: E-mail: ks_bondar@ukr.net;
R. Khomenko, PhD (Geol.),
E-mail: E-mail: hrstianin@bigmir.net,
Taras Shevchenko National University of Kyiv,
Institute of Geology, 90 Vasylkivska Str., Kyiv, 03022, Ukraine;
M. Bondarkov, Director General,
E-mail: mbondarkov@chornobyl.net;
A. Maksymenko, Deputy Director General,
E-mail: amaksimenko@chornobyl.net,
Chornobyl Center, PO Box 151,
11 77-th Gvardiis'ka dyviziya Str., Slavutych, 07100, Ukraine

COMBINATION OF GEOPHYSICAL TECHNIQUES FOR MAPPING AND MONITORING OF RADIOACTIVE WASTE DISPOSAL FACILITIES

Sites of radioactive waste disposal in Chernobyl exclusion zone still contain significant amounts of fissile materials. At the same time, the information on the amount of radioactive material buried during the accident cannot be called satisfactory. Within the strengthening international safety and environmental requirements, special activities were initiated to survey the radioactive waste disposals created during the liquidation of the accident at the Chernobyl nuclear power plant.

The work involved the following combination of non-invasive geophysical methods: 1) high-resolution magnetometry; 2) ground penetrating radar (GPR) 3) direct current electrical resistivity tomography (ERT). Magnetometry provided the detailed map of facilities, and highlighted the sites where containers with fissile substances had been buried. ERT models revealed variations in the resistivity across the disposal site, which is associated with different water content, and may indicate flooding. Ground water level was determined from GPR measurements. The combined interpretation of geophysical results served a basis for designing the geometric model of the "Chernobyl 3rd stage" radioactive waste disposal facility. It was used to determine the places for subsequent applying direct radioactive methods for investigation and monitoring of this disposal site.

Keywords: magnetometry, electrical resistivity tomography, ground penetrating radar, radiation dose, radioactive waste, groundwater.