

Надійшла 18.6.2012 р.  
Рецензент: д.т.н. Шинкарук О.М.

УДК 621.396.96

Л.О. КОВТУН, В.Р. ЛЮБЧИК

Хмельницький національний університет

О.М. КИЛИМНИК

ДП "Подільський експертно-технічний центр", м. Хмельницький

## ОГЛЯД МЕТОДІВ ПІДПОВЕРХНЕВОГО ЗОНДУВАННЯ

*Проведено аналіз методів підповерхневого зондування та розглянута їх класифікація.*

*The analysis of methods geoelectromagnetic exploration and their classification have been proposed in the article.*

Ключові слова: метод георозвідки, георадар, класифікація.

**Вступ.** Діагностика підземних комунікацій, ґрунтів під будівельні майданчики, дорожніх покриттів та злітно-посадкових смуг аеродромів, локальних неоднорідностей в ґрунті, мін, витоків з підземних сховищ палива, рівня ґрунтових вод, а також проведення геофізичних, археологічних та інших досліджень є задачею актуальною і досить важливою. Для розв'язання цих задач можуть застосовуватись георадари або, як їх іще називають, радари підповерхневого зондування. Слід зазначити, що особливістю георадарів є застосування надширококутних сигналів (відеоімпульсних, з дискретним переналаштуванням частоти), що розповсюджуються у середовищах з ярко вираженим затуханням та дисперсією [1].

На сьогодні не існує універсальної класифікації георадарів, що робить роботу дослідника складною та не дозволяє безпомилково обрати той чи інший метод для досліджень георадарів. Тому з'явилась необхідність у створенні класифікації, що і було поставлено за мету роботи.

**Основна частина.** Створення нових методів та засобів геодосліджень, розвиток вже існуючих методів та засобів неможливий без аналізу вже існуючих методів та засобів. На основі аналізу літературних джерел запропоновано класифікацію методів та засобів геодосліджень.

До класифікаційних ознак методів електророзвідки можна віднести наступні. За специфікою впливу на об'єкт дослідження, який обумовлює власне сам процес геодослідження та його особливості, за типом застосованих антен можна виділити:

- ґрунтові (контактні) антени, які безпосередньо контактують з поверхнею об'єкту досліджень;
- повітряні (рупорні) антени, які безпосередньо не стикаються з поверхнею об'єкту досліджень.

Недоліком перших георадарів є їх низька швидкість збору інформації. Тому для підвищення швидкості збору можуть бути застосовані повітряні антени. Проте вони дозволяють досліджувати ґрунти на значно меншій глибині.

За об'єктом дослідження методи георозвідки можуть бути поділені на наземні, свердловинні, аероелектророзвідні, морські, шахто-рудні (рис. 1).

Електророзвідка оснований на розділенні об'єктів дослідження за електромагнітними властивостями (наприклад, питомий електричний опір, електропровідність, електрохімічна активність, поляризованість, електрична та магнітна проникність). Таким чином, методи георозвідки можна класифікувати за видом поля, яке діє на об'єкт:

- природне змінне поле;
- постійне поле (опорів);
- фізико-хімічне (поляризаційне);
- низькочастотне (індуктивне) електромагнітне зондування та профілювання;

- високочастотне (радіохвильове) зондування та профілювання;

- надвисокочастотне (радіолокаційне);
- радіотеплова (інфрачервона та спектрометрична) зйомка.

Класична теорія електророзвідки постійним струмом заснована на вивченні середовищ, що відрізняються пасивністю (до включення струму середовище в електричному відношенні є нейтральним), лінійністю (напруженість поля в середовищі лінійно підвищується зі зростанням напруги струму), неполяризованістю (при пропусненні струму заряди не акумулюються в середовищі) і стаціонарністю (напруженість поля в кожній точці середовища однакова, якщо спосіб введення струму і сам струм незмінні). Такі середовища прийнято характеризувати лише питомим електричним опором, постійним в часі і незалежним від зовнішніх умов. Практика електророзвідки показує, що за існуючої невисокої точності спостережень (відносні похибки розрахункових параметрів поля досягають  $\pm 5\%$ ) реальні геологічні



Рис. 1. Класифікація методів георозвідки за об'єктом дослідження

середовища ці вимоги задовольняють. У теорії електророзвідки постійним струмом розв'язуються прямі і зворотні задачі для точкових, дипольних або лінійних джерел над різними фізико-геологічними моделями (ФГМ) середовищ, що відрізняються шматково-однорідною або градієнтною зміною питомого електричного опору в плані і по глибині.

До групи методів зондування та профілювання, що використовують низькочастотне змінне електромагнітне поле, входять магнітотелуричні методи (магнітотелурика), засновані на вивченні природного поля Землі (магнітотелуричного поля, МТ-поля), частотні зондування, індуктивні методи.

Магнітотелуричне поле – регіональна частина змінного електромагнітного поля Землі. Воно складається з телуричного (електричного) поля і магнітного поля. Зміни цього поля в часі називають магнітотелуричними варіаціями. Магнітотелуричні варіації викликаються коливаннями магнітосферичного та іоносферного струму. Спостерігаються також варіації атмосферного походження. Частотний спектр магнітотелуричних варіацій дуже широкий. При електророзвідувальних роботах зазвичай обмежуються спостереженням варіацій в інтервалі періодів від сотих часток секунди до 10–15 хв. Таке поле, що проникає на глибину від декількох десятків метрів до декількох кілометрів, дозволяє досліджувати осадовий чохол і рельєф кристалічного фундаменту. Якщо в завдання досліджень входить вивчення земної кори і верхньої мантії до глибин 100–200 км, то видимі періоди реєстрованих варіацій повинні досягати декількох годин.

До переваг магнітотелуричних методів відносяться велика глибинність досліджень, низька вартість і безпека робіт (у зв'язку з відсутністю потужних джерел струму і громіздких живильних ліній), портативність і мобільність апаратури (роботи можуть бути проведені у важкодоступних районах).

До недоліків можна віднести залежність магнітотелуричних варіацій від сонячної і грозової активності, пори року і доби, геомагнітної широти району робіт, геоелектричного розрізу. Максимуми інтенсивності варіацій, які мають космічне походження, припадають на роки підвищеної сонячної активності. Влітку інтенсивність магнітотелуричних варіацій вище, ніж взимку. У високих широтах амплітуди варіацій більше, ніж у низьких. Широтний розподіл регулярних пульсацій ускладнено середньосмуговими резонансними максимумами, положення яких змінюється з часом доби і частотою коливань.

Також одним з методів низькочастотної георозвідки є частотні зондування засновані за принципом скін-ефекту, тобто збільшення глибини проникнення поля зі зменшенням швидкості його зміни. Однак скін-ефект сильно залежить від типу джерела і відстані до нього. У зв'язку з цим фізико-математичною основою електромагнітних зондувань є вивчення змінних в часі електромагнітних полів джерел різних типів. Найбільш поширені джерела двох типів: вертикальний магнітний диполь (незаземлена горизонтальна рамка) і заземлений горизонтальний електричний диполь.

Глибина дослідження визначається частотою струму при фіксованому віддаленні точки спостереження від джерела. Як відомо, скін-ефект проявляється найчіткіше в хвильовій зоні, тобто при розносах, що перевищують середню довжину хвилі в розрізі. Проте зі збільшенням розносу погіршуються умови вимірювання компонент електромагнітного поля. Оптимальний рознос зазвичай обирається в  $5 \square 7$  разів більшим глибини залягання опорного горизонту.

У хвильовій зоні магнітного й електричного диполів максимальною роздільною здатністю характеризуються горизонтальні компоненти  $E$  і вертикальна компонента  $B$ . Саме вони використовуються в практиці частотних зондувань.

Індуктивні методи електророзвідки – низькочастотні методи, в яких збудження і прийом поля здійснюються за допомогою незаземлених контурів. Класичними методами, що входять в цю групу, є методи незаземленої петлі (НП) і дипольного індуктивного профілювання (ДІП). При таких способах збудження і прийому поля підкреслюється роль індукційних явищ, що відбуваються в провідних гірських породах і рудах. У зв'язку з цим в індукційних методах вивчаються змінні електромагнітні поля, що більше відрізняються від поля постійного струму, ніж поля, досліджувані іншими низькочастотними методами, які використовують гальванічні способи збудження або прийому поля. Зокрема, за не надто великих розмірів вимірювальних установок в певному діапазоні часу реєстрації перехідних характеристик поля або в області досить низьких частот вдається досягти такого ефекту, коли з усього неоднорідного середовища, охопленого полем збудження, практично вимірний внесок в спостережуване магнітне поле вносять лише струми в найбільш провідних частинах розрізу. Ця обставина становить основу успішного застосування індуктивних методів електророзвідки при пошуках масивних добре провідних руд.

Індуктивні методи успішно застосовують у поєднанні з магніторозвідкою з метою класифікації магнітних аномалій по магнітній проникності і залишковій намагніченості об'єктів, що утворюють аномалії, і їх деталізації на основі штучного завдання намагніченого поля. У цьому випадку частота збуджуючого поля обирається за можливістю низькою, щоб роль індукованих струмів в спостережуваному полі була невелика. Індуктивними методами вирішуються і завдання геоелектричного картування в рудних провінціях. З цією метою можуть застосовуватися й інші низькочастотні методи, які використовують заземлені установки. Так, при картуванні витягнутих провідних зон хороші результати дає так званий метод довгого кабелю (ДК), який умовно також відноситься до групи індуктивних методів. При вирішенні завдань загального геоелектричного картування все більшу роль починають грати методи дипольного електромагнітного профілювання і зондування при різних способах завдання і прийому поля, які вибирають, виходячи зі специфіки розв'язуваних геоелектричних завдань, а також з технічних міркувань. У цій області грані між індуктивними і іншими низькочастотними методами електророзвідки стираються.

Під дистанційними надвисокочастотними аерокосмічними зйомками розуміються дистанційні методи дослідження земної поверхні і геологічного середовища, засновані на вивченні електромагнітних випромінювань з довжиною хвилі в межах 1 м – 1 мкм і знаходяться на стику електророзвідки, терморозвідки і аерофототелевізійної зйомки. Ці методи поділяються на методи активної радіолокації, заснованої на вивченні відображених сигналів після опромінення земної поверхні з літальних апаратів, і пасивною, що використовує емісійні випромінювання земної поверхні.

До методів пасивної дистанційної радіолокації відносяться: радіотеплові та інфрачервоні зйомки (РТЗ і ІЧЗ) з використанням ближнього, середнього і далекого діапазону інфрачервоного випромінювання на електромагнітних хвилях довжиною у діапазонах 0,78-1,4; 1,4-10; 10-100 мкм, а також спектрометричні зйомки (СМЗ) в діапазоні хвиль 0,3-3 мкм. Методи пасивної радіолокації за методикою і технікою робіт, способами представлення матеріалів (у вигляді знімків) і прийомами інтерпретації (дешифрування) схожі на фототелевізійні зйомки. Однак замість поля яскравості, яке знімається за допомогою фотоапаратури видимого діапазону хвиль ( $0,6 < I_0 < 0,7$  мкм) в методах РТЗ, ІЧЗ, СМЗ вивчається температурне поле за допомогою тепловізорів, налаштованих на певні довжини хвиль, частіше всього 3-5 і 8-13 мкм та інші вікна прозорості атмосфери, що забезпечує роботу при наявності хмарності і вночі.

Видима температура карта відображає:

- нагрівання поверхні шарів внутрішніми джерелами тепла і Сонцем, а також теплові властивості гірських порід;
- випромінювання земної поверхні, що залежить насамперед від оптичних властивостей порід і ґрунтів на поверхні;
- умови проходження сигналу від земної поверхні до фотодетектора, які визначаються рельєфом місцевості;
- турбулентний обмін в повітрі (вітрові аномалії);
- хмарність та опади, що відрізняються різною прозорістю в різних інтервалах мікрометрового діапазону хвиль, і інші перешкоджаючі чинники.

Можна намітити коло геологічних задач, у розв'язанні яких дистанційні зйомки займають гідне місце:

- 1) складання нових і деталізація існуючих карт;
- 2) виявлення нових і уточнення морфології відомих глобальних, регіональних і локальних структур, а також їх взаємовідносин;
- 3) виявлення перспективних площ в найбільших рудних і нафтогазоносних провінціях;
- 4) дослідження глибинної будови рівнинних закритих територій;
- 5) вивчення важкодоступних високогірних районів і акваторій;
- 6) інженерно-геологічні, гідрогеологічні, гідромеліоративні вишукування;
- 7) вивчення та контроль за зміною водного, соляного і теплового режиму ґрунтів, що вкрай важливо для науково обґрунтованої меліорації земель та охорони геологічного середовища.

З численних модифікацій радіохвильових методів застосовують в основному три методи:

- радіокомпаративний,
- радіохвильове просвічування;
- радіохвильове зондування.

До радіохвильового просвічування відноситься не тільки варіант «просвічування» між свердловинами або гірничими виробками, тобто, як його називали, радіотіньовий метод, але також дослідження простору навколо одиночних виробок і свердловин.

У високочастотних методах використовуються електромагнітні поля, створювані або портативними передавачами, або радіостанціями, мовного або спеціального призначення. Ці методи можуть бути призначені для спостереження на поверхні Землі, в повітрі, під землею, в гірських виробках і свердловинах. Найбільш низькі частоти (10–450 кГц) використовуються в методі РадіоКІП, найбільш високі (0,1–40 МГц) – в методі радіохвильового просвічування [3].

Але при використанні радіоімпульсів з великим числом періодів в імпульсі і низькою частотою сигнали мають неприйнятно велику тривалість, а радар  $\square$  низьку роздільну здатність. У відеоімпульса число напівперіодів скорочується до 2–3, що збільшує роздільну здатність і робить її прийнятною для практичних цілей [4].

За принципом дії георадари можна класифікувати відповідно до схеми, наведеної на рис. 2. Найбільш часто використовуваним є відеоімпульсний метод зондування («часова область» на рис. 2).

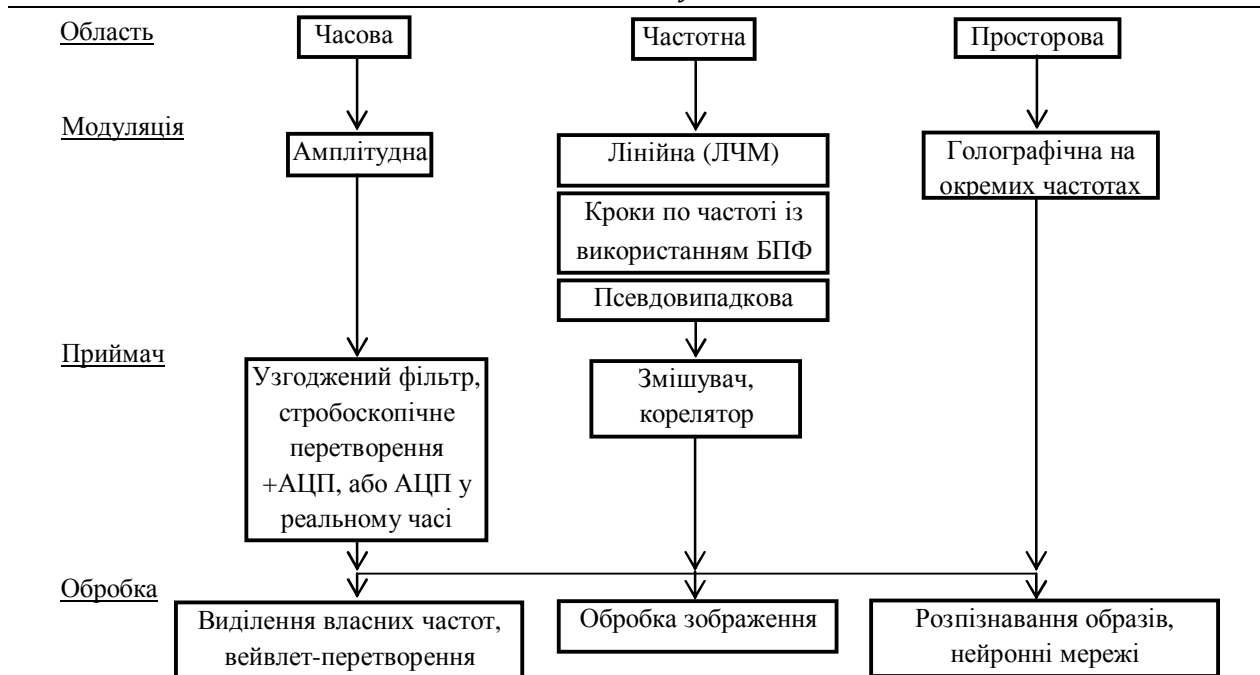


Рис. 2. Класифікація георадарів за принципом дії

Крім відеоімпульсних радарів існують радари, засновані на лінійно-частотній модуляції (ЛЧМ), і радари з покроковим переналаштуванням частоти і виміром амплітуди і фази на кожній частоті. Отриманий в кінцевому підсумку результат можна перетворити до того ж імпульсу, який виходить при зондуванні відеоімпульсними радарними. Уся різниця між зазначеними методами зондування та відеоімпульсним методом зводиться до апаратної реалізації процесу вимірювань.

Досвід роботи з георадарами показує, що оптимальним діапазоном частот для зондування верхніх декількох метрів у вологому піщаному або сухому глинистому ґрунті є діапазон 50-150 МГц (довжини хвиль в повітрі 6-2 м).

**Висновки.** На основі проведеного аналізу методів георозвідки запропоновано їх класифікацію. Основними класифікаційними ознаками є: специфіка впливу на об'єкт дослідження, тип об'єкта дослідження, вид поля, що застосовується при дослідженні, за принципом дії. За основну ознаку обрано вид поля, що застосовується при дослідженні, оскільки саме він зумовлює різноманітність існуючих методів та їх особливості.

Як показав аналіз, найбільшого поширення здобув метод, що оснований на застосуванні відеоімпульсів (надширокопasmових сигналів), який дозволяє підвищити роздільну здатність та точність за рахунок зменшення тривалості зонduючого імпульсу. Але при цьому розширюється частотний діапазон зонduючого сигналу, що призводить до ускладнення вимірювальної апаратури. Тому подальше дослідження слід проводити в напрямку розробки методів багаточастотної фазової підповерхневої радіолокації.

### Література

1. Вопросы подповерхностной радиолокации. Коллективная монография / Под ред. А.Ю. Гринева. М. : Радиотехника, 2005. 416 с.
2. Электроразведка: Справочник геофизика. В двух книгах / Под ред. В.К. Хмелевского и В.М. Бондаренко. Книга первая. – [2-е изд., перераб. и доп.]. – М. : Недра, 1989. – 438 с.
3. Электроразведка: Справочник геофизика : в двух книгах / Под ред. В.К. Хмелевского и В.М. Бондаренко. Книга вторая. – [2-е изд., перераб. и доп.]. – М. : Недра, 1989. – 378 с.
4. Теория и методы георадиолокации : [учеб. Пособие] / Изюмов СВ., Дручинин СВ., Вознесенский А.С – М. : Изд-во «Горная книга», Издательство Московского государственного горного университета, 2008. – 196 с.

Надійшла 5.6.2012 р.  
Рецензент: д.т.н. Параска Г.Б.