

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
КИЇВСЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ ІМЕНІ ТАРАСА ШЕВЧЕНКА

ЕЛЕКТРОМЕТРІЯ ПОСІБНИК ІЗ НАВЧАЛЬНОЇ ГЕОФІЗИЧНОЇ ПРАКТИКИ

Навчально-методичне видання

*Затверджено Міністерством освіти і науки, молоді та спорту України
як посібник для студентів геологічних спеціальностей
вищих навчальних закладів*



УДК 550.34(075.8)
ББК 26.2я73
Е50

Автори:
С. А. Вижва, М. В. Рева, І. І. Онищук, В. І. Онищук

Рецензенти:
д-р геол.-мінерал. наук, проф. В. М. Курганський
(Київський національний університет імені Тараса Шевченка)
д-р фіз.-мат. наук, ст. наук. співроб. В. М. Шуман
(Інститут геофізики НАН України)

*Рекомендовано до друку вченою радою геологічного факультету
(протокол № 3 від 10.10. 2012 року)*

*Ухвалено науково-методичною радою
Київського національного університету імені Тараса Шевченка
14 листопада 2012 року*

Е50 Електрометрія. Посібник із навчальної геофізичної практики :
навч.-метод. видання / С. А. Вижва, М. В. Рева, І. І. Онищук,
В. І. Онищук. – К.: Видавничо-поліграфічний центр "Київський
університет", 2013. – 303 с.

ISBN 978-966-439-692-6

Коротко викладено фізико-геологічні основи електрометричних методів досліджень. Розглянуто методи електророзвідки на постійному та змінному струмі, надані практичні рекомендації їх реалізації в процесі навчальної геофізичної практики.

Розраховано на студентів-геофізиків вищих навчальних закладів, а також фахівців-геофізиків наукових і виробничих організацій.

УДК 550.34(075.8)
ББК 26.2я73

**Гриф надано Міністерством освіти і науки, молоді та спорту України
(лист № 1/11-3411 від 18.02.2013р.)**

ISBN 978-966-439-692-6

© Вижва С. А., Рева М. В, Онищук І. І., Онищук В. І., 2013
© Київський національний університет імені Тараса Шевченка,
ВПЦ "Київський університет", 2013

З М І С Т

ВСТУП.....

1. ЕЛЕКТРОМАГНІТНІ ВЛАСТИВОСТІ ГІРСЬКИХ ПОРІД.....

1.1. Питомий електричний опір (ρ)

1.2. Діелектрична проникність (ϵ)

1.3. Магнітна проникність (μ)

1.4. Електрохімічна активність (α).....

1.5. Поляризованість (η).....

1.6. Геоелектричний розріз та його характеристики

2. ЕЛЕКТРИЧНІ ТА ЕЛЕКТРОМАГНІТНІ ПОЛЯ.....

2.1. Постійні електричні та електрохімічні поля

2.1.1. Постійне електричне поле штучних джерел

2.1.2. Природні постійні електричні поля

2.1.3. Електричне поле викликане (спричинене) поляризації.....

2.2. Гармонійні електромагнітні поля

2.2.1. Загальна характеристика гармонійних електромагнітних полів

2.2.2. Плоске гармонійне електромагнітне поле

2.2.3. Електромагнітні поля локальних джерел

2.2.4. Радіохвильове поле Землі.....

2.3. Неусталене електромагнітне поле

2.4. Природні, змінні в часі електромагнітні поля.....

3. КЛАСИФІКАЦІЯ МЕТОДІВ ПРИКЛАДНОЇ ЕЛЕКТРОМЕТРІЇ ТА ЕЛЕКТРОРОЗВІДУВАЛЬНА АПАРАТУРА.....

3.1. Класифікація електророзвідувальних методів

3.2. Електророзвідувальна апаратура.....

3.2.1. Способи вимірів електромагнітних полів.....

3.2.2. Генератори.....

- 3.2.3. Датчики для вимірів параметрів електромагнітного поля.....
- 3.2.4. Вимірювачі
- 3.2.5. Спеціалізація апаратури за групами методів

4. МЕТОДИ ЕЛЕКТРОРОЗВІДКИ НА ПОСТІЙНОМУ СТРУМІ З КОНТРОЛЬОВАНИМИ ДЖЕРЕЛАМИ

- 4.1. Вертикальне електричне зондування
- 4.1.1. Монтажна схема польової електрометричної установки
- 4.1.2. Методика польових робіт.....
- 4.1.3. Обробка результатів польових спостережень.....
- 4.1.4. Інтерпретація кривих ВЕЗ.....
- 4.2. Дипольні електричні зондування (ДЗ).....
- 4.3. Методи електричного профілювання.....
- 4.3.1. Профілювання симетричною чотирьохелектродною установкою
- 4.3.2. Профілювання дворозносною симетричною установкою
- 4.3.3. Комбіноване електропрофілювання.....
- 4.3.4. Профілювання способом серединних градієнтів.....
- 4.3.5. Дипольне профілювання
- 4.3.6. Кругове електропрофілювання.....
- 4.3.7. Принципи інтерпретації результатів електропрофілювання.....
- 4.3.8. Геологічне застосування електропрофілювання.....
- 4.4. Метод зарядженого тіла
- 4.4.1. Зйомка способом еквіпотенціальних ліній.....
- 4.4.2. Зйомка градієнта потенціалу
- 4.4.3. Гідрогеологічний варіант методу заряду.....

5. МЕТОД ПРИРОДНОГО ЕЛЕКТРИЧНОГО ПОЛЯ.....

- 5.1. Методика робіт.....
- 5.1.1. Спосіб потенціалів
- 5.1.2. Спосіб градієнтів потенціалу.....
- 5.2. Інтерпретація експериментальних даних
- 5.2.1. Якісна інтерпретація.....

5.2.2. Кількісна інтерпретація аномалій природного поля.....	
5.3. Область застосування методу природного поля	
6. МЕТОД ВИКЛИКАНОЇ (СПРИЧИНЕНОЇ) ПОЛЯРИЗАЦІЇ.....	
6.1. Вертикальні електричні зондування методом викликаної поляризації.....	
6.2. Профілювання методом ВП	
7. МАГНІТОТЕЛУРИЧНІ МЕТОДИ.....	
7.1. Магнітотелуричне зондування.....	
7.2. Методи телуричних струмів та магнітотелуричного профілювання	
8. НИЗЬКОЧАСТОТНІ МЕТОДИ ЕЛЕКТРОРОЗВІДКИ З КОНТРОЛЬОВАНИМИ ДЖЕРЕЛАМИ.....	
8.1. Частотні електромагнітні зондування.....	
8.2. Метод зондування становленням поля	
8.2.1. Зондування становленням поля в дальній зоні	
8.2.2. Зондування становленням поля в ближній зоні.....	
8.3. Методи низькочастотного індуктивного профілювання	
8.3.1. Метод довгого кабеля.....	
8.3.2. Дипольне індуктивне профілювання	
8.3.3. Метод незаземленої петлі.....	
8.3.4. Метод перехідних процесів.....	
8.4. Метод природного імпульсного електромагнітного поля Землі	
8.4.1. Методика робіт.....	
8.4.2. Аналіз експериментальних даних	
9. ВИСОКОЧАСТОТНІ МЕТОДИ ЕЛЕКТРОРОЗВІДКИ.....	
9.1. Радіокомпаративний метод (метод радіокіп).....	
9.2. Метод дипольного електромагнітного профілювання	
9.3. Метод радіохвильового просвічування.....	

9.4. Георадарне зондування.....

ПИТАННЯ ДЛЯ САМОКОНТРОЛЮ

ЛІТЕРАТУРА.....

Додаток А.....

Додаток Б.....

Додаток В.....

Додаток Г.....

ВСТУП

Навчальна геофізична практика є одним із важливих етапів навчального процесу професійної підготовки студентів-геофізиків і має за закріпити отримані ними теоретичні знання шляхом практичного виконання комплексу геофізичних методів у польових умовах. Серед геофізичних методів, що проводяться під час навчальної практики, електророзвідка є одним із достатньо складних її розділів. Між тим навчальна література з питань практичного застосування електророзвідки на даному етапі практично відсутня. Цей посібник покликаний теоретично та методично забезпечити навчальну практику з електророзвідки й укладений на основі досвіду її багаторічного проведення кафедрою геофізики геологічного факультету Київського національного університету імені Тараса Шевченка.

Електрична розвідка (електророзвідка) – це комплекс методів вивчення структури геоелектричного розрізу земної кори на основі вимірів параметрів електричних та електромагнітних полів як природних земних, так і штучних (контрольованих) джерел. Застосування цих методів спрямоване на вирішення різноманітних задач – геологічного картування, пошуків та розвідки корисних копалин, інженерно-геологічних, гідрогеологічних та екологічних досліджень, моніторингу небезпечних геологічних процесів.

Особливістю електророзвідки як геофізичного методу в порівнянні з іншими є значне різноманіття її модифікацій. Ця обставина зумовлена наступними об'єктивними факторами:

1. В електророзвідці використовується не одна фізична властивість геологічних утворень, а декілька: питомий електричний опір (ρ), діелектрична (ϵ) та магнітна (μ) проникності, електрохімічна активність (α) та поляризованість (η) гірських порід.

2. В електророзвідці вимірюються параметри як природних електричних та електромагнітних полів, так і створених штучними (контрольованими) джерелами.

3. Контрольовані джерела, що застосовуються для збудження електромагнітних полів, можуть бути як електричного, так і

магнітного типів. Перші мають безпосередній гальванічний контакт із землею (наприклад, заземлена на кінцях лінія), другі такого контакту не мають. Вони, як правило, являють собою незаземлені петлі або індукційні рамки, у контурі яких протікає електричний струм. Ці джерела створюють первинне збуджуюче магнітне поле.

4. При електрометричних дослідженнях використовується досить широкий частотний спектр електромагнітних полів: від постійних до височастотних у межах десятків, навіть сотень мегагерц.

5. Виміри параметрів електромагнітних полів можуть виконуватися на поверхні землі (*наземна електророзвідка*), під землею (*підземна електророзвідка*), на водних акваторіях (*морська електророзвідка*) і в повітрі (*аероелектророзвідка*).

Таким чином, ці п'ять об'єктивних факторів спричинюють в електрометрії значне різноманіття модифікацій, кількість яких складає біля 60-ти.

Об'єктом дослідження в електророзвідці є *геоелектричний розріз*. Він показує просторове розміщення геологічних об'єктів, що відрізняються за фізичними властивостями. Необхідно зауважити, що електромагнітні поля сприймають об'єкти, які відрізняються тільки за фізичними властивостями. Отже, не завжди геологічний розріз, в основі якого лежать літолого-петрографічні та вікові відмінності порід, відповідає геоелектричному. Але, як правило, кореляція між ними наявна в переважній більшості випадків.

Електророзвідка поєднує дві фундаментальні групи методів – *профілювання та зондування*. Вони відрізняються за метою дослідження. Методи першої групи спрямовані на вивчення зміни електромагнітних властивостей геоелектричного розрізу в горизонтальному напрямку або, як кажуть, по латералі (по профілю чи по площі), приблизно на однаковому глибинному рівні. Методи другої групи виявляють зміну електромагнітних властивостей геоелектричного розрізу з глибиною.

В електророзвідці, як і взагалі в геофізиці, виділяють пряму й обернену задачі. *Пряма задача* полягає у вивченні характеру та структури електричного чи електромагнітного полів для заданої (відомої) моделі геоелектричного розрізу при заданих (відомих) характеристиках джерел поля. Вона розв'язується або аналітич-

ним способом, із застосуванням положень теорії електромагнітного поля та сучасного математичного апарату, або шляхом математичного чи фізичного моделювання. *Обернена задача* електророзвідки полягає у визначенні моделі геоелектричного розрізу за спостереженим електричним чи електромагнітним полями. Вона відноситься до складних задач інтерпретації експериментальних даних. У результаті розв'язання оберненої задачі встановлюється з певним наближенням структура реального геоелектричного розрізу чи окремих його елементів.

Електророзвідка – цікавий і складний геофізичний метод. Він має досить тісний зв'язок із такими фундаментальними науковими дисциплінами, як математика, фізика, хімія, електродинаміка. У свою чергу розв'язання багатьох прикладних електрометричних задач вплинуло на розвиток фундаментальних основ цих наукових напрямків, особливо електродинаміки провідних середовищ.

В Україні електрометрія широко використовувалася при вивченні геологічної будови Дніпровсько-Донецької западини, Українського щита, Донбасу, Криму, Карпат та інших регіонів. І нині вона знаходить широке застосування, у комплексі з іншими геофізичними методами, при вирішенні як суто геолого-пошукових, так й інженерно-геологічних, гідрогеологічних, екологічних задач та задач моніторингу небезпечних геологічних процесів.

Зважаючи на досить обмежений час навчальної геофізичної практики, у даному навчальному посібнику більш широко висвітлені методи електророзвідки, що безпосередньо виконуються при польових дослідженнях. Це методи: вертикального електричного зондування, електричного профілювання (симетричне, комбіноване, дипольне, серединного градієнта), природного електричного поля, викликаного (спричиненої) поляризації, магнітотелуричне зондування, частотне електромагнітне зондування, метод становлення поля. Інші методи електророзвідки викладені більш коротко, схематично для повторення та закріплення знань студентів, отриманих у процесі викладання нормативного курсу "Електрометрія".

Навчальний посібник містить 80 ілюстрацій, 4 додатки та 5 таблиць, більшість із яких виконані для цього видання. Деякі рисунки та таблиці запозичені з публікацій. Посилання на конк-

ретні джерела рисунків та таблиць в тексті не даються: вони громіздкі й для навчального посібника навряд чи актуальні, оскільки ніякі його розділи не претендують на назву наукових.

Зауваження просимо надсилати безпосередньо авторам на кафедру геофізики Київського національного університету імені Тараса Шевченка за адресою: 03022, м. Київ, вул. Васильківська, 90, к. 327, 322.

1. ЕЛЕКТРОМАГНІТНІ ВЛАСТИВОСТІ ГІРСЬКИХ ПОРІД

У практичній електрометрії об'єктом вивчення є гірські породи в їх природному заляганні. Гірська порода являє собою складне природне утворення, що складається із твердої мінеральної маси, пори та тріщини якої заповнені підземною водою, нафтою, газом чи перевідкладеним матеріалом. Кількісні співвідношення між цими компонентами залежать від багатьох факторів: умов утворення гірських порід, глибини їх залягання, пористості чи тріщинуватості, вологонасиченості, температури, тиску та ін. Усі ці фактори впливають на електромагнітні властивості гірських порід, відмінність яких і складає фізичну основу застосування методів електророзвідки.

На просторово-часову структуру електромагнітних полів впливають такі властивості гірських утворень, як *питомий електричний опір* (ρ), *діелектрична проникність* (ϵ), *магнітна проникність* (μ), *електрохімічна активність* (α) та *поляризованість* (η).

1.1. Питомий електричний опір (ρ)

Питомий електричний опір (ρ) – це електрична властивість гірських порід, яка характеризує їх здатність пропускати електричний струм і є основною в електророзвідці. Кількісно питомий електричний опір дорівнює електричному опору куба гірської породи зі стороною 1 м електричному струму, що протікає паралельно його боковим граням. Одиниця виміру питомого опору – ом-метр (Ом·м). Величина, обернена питомому опору, називається *питомою електричною провідністю* (γ) і вимірюється в сименсах на метр (См/м). Сименс – це Ом⁻¹.

Як і інші речовини, гірські породи за природою провідності поділяються на електронні провідники (провідники I роду), в яких електричні заряди переносяться вільними електронами, та іонні провідники (провідники II роду), в яких електричні заряди перено-

сяться іонами розчинів, що заповнюють пори, тріщини і т. ін. (табл.1.1). Деякі породи мають змішану електропровідність.

Таблиця 1.1

Розподіл гірських порід за характером електропровідності

Характер електропровідності	Мінерали і гірські породи
Електронна провідність (провідність I роду)	<p><i>Самородні метали:</i> платина, золото, срібло, мідь.</p> <p><i>Сульфіди:</i> борніт, галеніт, ковелін, піротин, пентландит, арсенопірит, халькопірит та ін.</p> <p><i>Деякі окисли:</i> магнетит, залізний блиск, каситерит та ін.</p> <p>Графіт, висококарбонізоване вугілля</p>
Іонна провідність (провідність II роду)	Усі осадові, метаморфічні та вивержені породи, природні води

Питомий електричний опір гірських порід залежить від багатьох факторів: мінералогічного складу, пористості та тріщинуватості, вологості, мінералізації підземних вод, структури й текстури гірських порід, температури та тиску.

За значенням опору мінерали поділяються наступним чином: 1) мінерали дуже низького опору (менше 10^{-5} Ом·м) – золото, платина, срібло; 2) мінерали низького опору (від 10^{-5} до 1 Ом·м) – сульфіди (пірит, халькопірит, арсенопірит, марказит, галеніт та ін.), деякі окисли (каситерит, борніт, магнетит та ін.), графіт та деяке вугілля; 3) мінерали середнього опору (від 1 до 10^5 Ом·м) – гематит, боксит, кіновар, ангідрит, шесліт та ін.; 4) мінерали високого та дуже високого опору (від 10^5 до 10^{12} Ом·м), які складають основну групу породотвірних мінералів – польові шпати, кварц, кальцит, слюди, нафта та ін.

Чим більший процентний склад добре провідних мінералів в гірській породі, тим менший її питомий опір. У переважної більшості гірських порід породотвірні мінерали мають надто ви-

сокий опір. Подібні гірські породи в першому наближенні можна вважати такими, що складаються із мінерального скелета та природного розчину, який заповнює пори й тріщини. Їх електропровідність визначається: 1) *електропровідністю мінерального скелета*, яка завдяки високому опору породотвірних мінералів мало впливає на електропровідність у цілому; 2) *електропровідністю води*, що заповнює пори в породі та називається вільною; 3) *поверхневою електропровідністю*, спричиненою наявністю на зернах породи поверхневого, зв'язаного шару води. Зважаючи на ці обставини, можна стверджувати, що останні два фактори є домінуючими при визначенні електропровідності більшості осадових, метаморфічних та вивержених порід.

Зі збільшенням *пористості* чи *тріщинуватості* опір породи зменшується, оскільки збільшується кількість поверхневої й імовірність наявності в порах вільної води. Збільшення водонасиченості порового простору приводить до зменшення опору породи. Цим зокрема пояснюється менший питомий опір гірських утворень, що знаходяться нижче рівня ґрунтових вод, де заповнення пор водою максимальне, у порівнянні з питомим опором порід, розташованих вище рівня ґрунтових вод. Найбільші відмінності тут відмічаються в крупнозернистих пісках, гальці, дуже тріщинуватих скельних породах. А ось у глинистих породах опір вище й нижче рівня ґрунтових вод відрізняється несуттєво через велику кількість у цих породах міцно зв'язаної води.

Опір гірських порід залежить від електропровідності підземної води. При малих концентраціях солей, які частіше за все зустрічаються в природних умовах, опір води можна вважати величиною обернено пропорційною концентрації і такою, що мало залежить від складу розчинених солей.

Будова струмопровідних шляхів, характер розташування пор і тріщин, їх орієнтація, тобто фактично *структурно-текстурні* особливості будови гірських утворень, приводять до *електричної анізотропії* – залежності питомого електричного опору від напрямку протікання електричного струму. У першу чергу анізотропія властива майже всім глинистим осадовим гірським породам і сланцям, які складаються з тонких чи потужних проша-

рків різного опору. Такі породи краще пропускають струм уздовж шаруватості, аніж упоперек. У метаморфічних порід також спостерігається більша електропровідність уздовж простягання. У тріщинних скельних породах більш сприятливим напрямком протікання струму є простягання системи тріщин, отже вони теж мають електричну анізотропію.

Величина анізотропії характеризується коефіцієнтом анізотропії λ та середнім квадратичним опором анізотропної товщі ρ_m :

$$\lambda = \sqrt{\rho_n / \rho_t}; \quad \rho_m = \sqrt{\rho_n \rho_t},$$

де ρ_n – питомий електричний опір, перпендикулярний нашаруванню чи напрямку простягання системи тріщин; ρ_t – питомий електричний опір за нашаруванням або вздовж системи тріщин. Значення коефіцієнта анізотропії може досягати 3. Найбільш чітко виражена електрична анізотропія для графітистих та вуглистих сланців, кам'яного вугілля, глинистих сланців, шаруватих пісковиків.

У табл. 1.2 наведені інтервали зміни опорів деяких мінералів і порід. Найбільш високими опорами відзначаються скельні породи (вивержені та метаморфічні), в яких значення питомих опорів може досягати 10000 Ом·м. На величину опорів скельних порід впливають такі фактори, як тріщинуватість, вивітреність, вологонасиченість та мінералізація підземних вод.

Опір дисперсних осадових порід практично повністю визначається *гідрогеологічними умовами*. Так сухі піски можуть мати опір, що досягає десятків тисяч омметрів, тоді коли в умовах повного вологонасичення він знижується до десятків, а при сильно мінералізованих водах і до одиниць омметрів. Найбільш низькими й витриманими опорами відрізняються глинисті породи. Глини морського походження мають ρ від 1 – 2 до 10 Ом·м. Для континентальних глин характерні величини 5 – 20 Ом·м, для суглинків – 20 – 40 Ом·м, супісків – 30 – 60 Ом·м. У цілому зі збільшенням розмірів зерен крихких відкладів питомий електричний опір зростає. При переході від глин до суглинків, супісків, пісків і гравійних відкладів опір змінюється від одиниць до сотень омметрів.

Таблиця 1.2

Електричні властивості деяких мінералів і порід при температурі +20°

Мінерали і породи	ρ (Ом·м)	ϵ_r
<u>Мінерали</u>		
Кварц	10^1-10^{14}	4,2 – 5,5
Польові шпати	$10^{10}-10^{12}$	4 – 10
Слюди	$10^{10}-10^{15}$	5 – 8
Хлориди	$10^{12}-10^{15}$	5 – 6
Нафта	10^9-10^{14}	10 – 30
Кальцит	10^8-10^{12}	7,5 – 8,5
Ангідрит	10^7-10^{10}	6 – 6,5
Апатит	10^4-10^6	7,5 – 10,5
Вода	$10^{-1}-10^5$	80
Графіт	$10^{-4}-10^2$	–
Сульфіди	$10^{-4}-10$	8 – 17
<u>Породи</u>		
Ультраосновні (дуніт, перидотит, піроксеніт)	10^3-10^6	7 – 15
Основні (габро, діабаз, базальт)	10^3-10^5	6 – 12
Середні (діорит, сієніт та ін.)	10^3-10^4	7 – 12
Кислі (граніт, дацит та ін.)	10^2-10^4	6 – 10
Кварцити, гнейси	10^3-10^5	5 – 12
Кам'яне вугілля	10^2-10^4	3 – 12
Вапняки	10^2-10^4	8 – 12
Пісковики	$10 - 10^3$	5 – 11
Пісок	$1 - 10^5$	3 – 25
Глина	$1 - 20$	4 – 0

На значення питомого електричного опору впливає також *температурний фактор*. Відомо, що при підвищенні температури опір провідників другого роду (гірські породи переважно належать до них) завдяки збільшенню рухливості іонів знижується. Це явище доводиться враховувати при вивченні електричних властивостей порід на великих глибинах.

Температурний фактор має вирішальне значення при температурах нижче нуля. У цьому випадку в складі гірських порід з'являється лід, опір якого близький до опору скелета (порядку

$10^{10} - 10^{12}$ Ом·м). Питомий електричний опір більшості порід зростає стрибком при переході до від'ємних температур, тобто при формуванні криогенної структури (температура $-0,02$ °С – -2 °С, при якій замерзає вільна вода). Так опір пісків і грубоуламкових порід при -1 °С у сотні разів вищий ніж при $+0,5$ °С. Для глинистих порід він зростає в декілька раз при зниженні температури до -2 °С – -6 °С. Для масивних скельних порід відношення опорів замерзлої й талої породи не перевищує 10 і досягає декількох десятків, коли ці породи тріщинуваті. У цілому опір мерзлих порід, як правило, не перевищує десятків тисяч Ом·м.

На питомий опір гірських порід впливає також *фактор тиску*. Експериментально встановлено, що з ростом тиску електричний опір породи збільшується, у зв'язку зі зміною структури порового простору порода ущільнюється і, як наслідок, зменшується її водонасиченість.

У надрах Землі зі збільшенням глибини зростає температура й тиск – два протилежних щодо впливу на електричний опір порід фактори. За даними глибинних електрометричних досліджень є всі підстави вважати, що на глибинах у декілька сот кілометрів питомий електричний опір складає $1 - 0,1$ Ом·м, а на глибинах у декілька тисяч кілометрів він на два-три порядки менший.

1.2. Діелектрична проникність (ϵ)

В атомах та молекулах хімічних елементів, що входять до складу гірських утворень, є зв'язані електричні заряди. Під силовою дією накладеного зовнішнього електричного поля вони набувають певної впорядкованої орієнтації, створюючи таким чином додаткове електричне поле. Отже в реальній гірській породі напруженість електричного поля буде відрізнятися від напруженості цього ж поля у вакуумі завдяки спричиненій електростатичній поляризації. *Діелектрична проникність*, як електромагнітна властивість гірської породи, показує здатність породи змінювати напруженість первинного електричного поля внаслідок електростатичної поляризації цієї породи. Вимірюється діелектрична проникність у фарадах на метр ($\Phi/m = c \cdot \text{Ом}^{-1}/m$).

Розрізняють абсолютну ε і відносну ε_r діелектричні проникності. Відносна проникність показує в скільки разів зміниться ємність конденсатора в даній породі щодо його ємності у вакуумі. Мірою відносної діелектричної проникності є її абсолютне значення у вакуумі: $\varepsilon_0 = 10^{-9}/(36\pi) \approx 8,85 \cdot 10^{-12}$ Ф/м. Тоді $\varepsilon_r = \varepsilon/\varepsilon_0$ або $\varepsilon = \varepsilon_r \varepsilon_0$.

Значення відносної діелектричної проникності деяких мінералів і порід наведені в табл. 1.2, з якої видно, що вона змінюється від 2 – 3 до 30 – 40. Мінімальні значення ε_r мають сухі пористі породи, максимальні – ті ж, але повністю водонасичені. Основний фактор, що визначає ε порід, є їх водонасиченість, оскільки діелектрична проникність води максимальна ($\varepsilon_r = 80$). Водонасиченість, у свою чергу, залежить від пористості та тріщинуватості.

Діелектрична проникність впливає на характер електромагнітного поля лише на частотах вище 10^5 Гц, тобто ця властивість може бути використана лише у високочастотних методах електророзвідки.

1.3. Магнітна проникність (μ)

Магнітна проникність – це властивість, що характеризує здатність речовини (гірської породи) концентрувати в собі силові лінії зовнішнього магнітного поля. Одиницею виміру магнітної проникності є генрі на метр ($\text{Гн/м} = \text{с} \cdot \text{Ом/м}$). Розрізняють також, як і у випадку діелектричної проникності, абсолютну й відносну магнітні проникності. Відносна магнітна проникність μ_r визначається відношенням абсолютної магнітної проникності речовини μ до абсолютної магнітної проникності вакууму $\mu_0 = 4\pi \cdot 10^{-7}$ Гн/м: $\mu_r = \mu/\mu_0$. Звідси $\mu = \mu_r \mu_0$.

Відносна магнітна проникність показує, у скільки разів збільшується сила магнітної взаємодії електричних струмів при перенесенні їх із вакууму в дане середовище. Для більшості гірських порід $\mu_r = 1$. Лише у феромагнетиків (магнетит, титаномагнетит, піротин) вона може досягнути декількох десятків. У зв'язку з цим μ_r деяких руд, до складу яких входять феромагнітні мінерали, дорівнює 3 – 10 і більше.

Магнітні властивості гірських порід вивчають також за параметром, який називається магнітною сприйнятливістю $\chi = 1 - \mu_r$. За цим параметром, на відміну від відносної магнітної проникності μ_r , спостерігається досить суттєва диференціація гірських порід.

1.4. Електрохімічна активність (α)

На границях твердих частинок породи та підземної води, а також розчинів із різною концентрацією через різні фізико-хімічні процеси часто виникає самочинна поляризація порід, що зумовлює виникнення природних електричних полів (більш детально про природу цих полів ітиметься в наступному розділі). Такі поля поділяються на: а) дифузійно-адсорбційні; б) фільтраційні; в) окислювально-відновні. Для характеристики властивості порід самочинно поляризуватися вводиться параметр, який називається електрохімічною активністю α . Залежно від природи поля розрізняють відповідно дифузійно-адсорбційну активність α_{da} , фільтраційну активність α_f та окислювально-відновну активність α_{ov} .

Дифузійно-адсорбційна активність α_{da} визначається хімічним і мінералогічним складом гірських порід, їх пористістю, дисперсністю, а також хімічним складом і мінералізацією підземних вод. Вона змінюється від -5 мВ у чистих пісків до +5 – +10 мВ в алевролітів і до +50 мВ у глин і мергелів.

Величина *фільтраційної активності α_f* також залежить від мінерального складу порід, їх пористості, проникності, а також мінералізації, питомого опору, діелектричної проникності та в'язкості підземних вод. Значення цього параметра може досягати десятків мВ.

Окислювально-відновна активність α_{ov} – це параметр, що характеризує властивість руд створювати на границі електронних та іонних провідників природні потенціали. Основну роль при цьому відіграють окислювально-відновні хімічні реакції. Окислювально-відновна активність залежить від багатьох факторів: хімічного складу мінералів, структури та електропровідності рудних покладів (масивні провідні поклади поляризуються сильніше, ніж вкраплені руди), хімічного складу та концентрації підземних вод і газів, особливо кисню, зональності й динаміки підземних вод. Окислювально-відновна активність значно вища за дифузійно-адсорбційну й фільтраційну активності порід і в деяких випадках може досягати +1000 – +1200 мВ.

Для визначення електрохімічної активності різної природи застосовуються спеціальні лабораторні установки та відповідні методики лабораторних досліджень.

1.5. Поляризованість (η)

При пропусканні електричного струму через породу вона поляризується. Природа такої викликаної поляризації зумовлена різними електрохімічними й електрокінетичними процесами, що відбуваються при проходженні в середовищі електричного струму. Зовнішньо це віддалено нагадує процес "зарядки", інколи цей термін так і вживається.

У результаті "зарядки" у провідному середовищі виникають вторинні електричні поля викликаної (спричиненої) поляризації. При вимкненні електричного струму відбувається поступове зникнення вторинного поля й повернення середовища до свого первинного стану.

Інтенсивність потенціалів спричиненої поляризації прийнято виражати через параметр η , який називається *поляризованістю* середовища. Зазвичай під цією характеристикою розуміють відношення залишкової різниці потенціалів поля спричиненої поляризації ΔU_{en} , виміряної через 0,5 с після вимкнення електричного струму в живильній лінії, до різниці потенціалів ΔU , виміряної під час пропускання електричного струму перед його вимкненням. Поляризованість частіше виражається в процентах: $\eta = (\Delta U_{en} / \Delta U) \cdot 100\%$.

Величина η для різних порід змінюється від 0,1 до 30 – 40% і залежить від мінерального складу, структурно-текстурних особливостей порід, вологості та мінералізації підземних вод. Якщо порода чи руда має у своєму складі електропровідні мінерали низького опору (сульфіди, графіт і т. ін.), то поляризованість може мати аномальні значення в межах 10 – 40% і на неї мало впливає мінеральний склад. Поляризованість залежить як від процентного вмісту електропровідних мінералів, так і від площі їх стикання з іонними провідниками (розчинами), на якій відбуваються електрохімічні реакції. Поляризованість порід, що вміщують рудні мінерали, зростає також зі збільшенням вологості.

У породах, які не вміщують електропровідні мінерали, значна поляризованість (до 3 – 6%), притаманна масивним кристалічним та деяким піщано-глинистим утворенням. Найменші значення η (1%) мають скельні, осадові та піщано-глинисті породи, насичені мінералізованими водами. Викликана поляризація піщано-глинистих відкладів залежить від кількості глинистих (дрібнодисперсних) часток, досягаючи максимуму (при вмісті глин) 3 – 10%. У певних геолого-гідрогеологічних умовах величина поляризованості порід залишається достатньо постійною.

1.6. Геоелектричний розріз та його характеристики

Реальний геологічний розріз відображається за даними електромагнітних вимірів у вигляді деякої електричної моделі, що називається *геоелектричним розрізом*. Він являє собою вертикальний розріз гірських порід, які відрізняються за електричними властивостями: питомим опором, діелектричною та магнітною проникністю та поляризованістю. У більшості випадків основним параметром є питомий опір. Приклади геоелектричних розрізів показані на рис. 1.1.

Пласти гірських порід зображуються на геоелектричному розрізі у вигляді електричних шарів, властивості яких на границях поділу змінюються стрибками, а за простяганням залишаються не змінними або монотонно змінюються в певних незначних межах. Окремі електричні границі досить добре співпадають із літологічними чи стратиграфічними й слугують *маркувальними горизонтами* для узгодження геофізичних і геологічних даних. Загалом електричні границі можуть не співпадати з літологічними та стратиграфічними. Це пояснюється значним впливом мінералізації підземних вод на питомий опір гірських порід. Часто комплекс порід, різних за складом і віком, характеризується однаковими електричними властивостями.

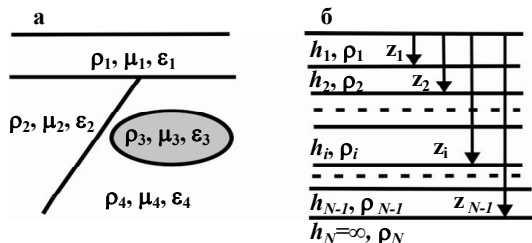


Рис. 1.1. Приклади складного (а) та горизонтально-шарового (б) геоелектричних розрізів

Однією із фундаментальних моделей геоелектричного розрізу є горизонтально-шарова. *Горизонтально-шарові* або близькі до них геоелектричні розрізи складаються з окремих однорідних за електричними властивостями горизонтів обмеженої потужності, які завершуються останнім горизонтом нескінченної потужності (рис.1.1, б). Цей горизонт називається *основою геоелектричного розрізу*. Потужні пласти щодо високого чи низького опору, що простежуються на значній площі району робіт, називаються *опорними*.

Горизонтально-шарові геоелектричні розрізи прийнято типізувати. Тип розрізу залежить від кількості горизонтів та співвідношення їх питомих опорів.

Двошаровий розріз містить один шар з обмеженою потужністю h_1 та питомим опором ρ_1 і другий шар із необмеженою потужністю $h_2 \rightarrow \infty$ та питомим опором ρ_2 . За співвідношенням опорів може бути два варіанти розрізу: $\rho_1 < \rho_2$ і $\rho_1 > \rho_2$.

Тришаровий розріз містить три горизонти. Для нього за співвідношенням питомих опорів встановлені чотири типи: тип *H* – $\rho_1 > \rho_2 < \rho_3$, тип *K* – $\rho_1 < \rho_2 > \rho_3$, тип *A* – $\rho_1 < \rho_2 < \rho_3$ і тип *Q* – $\rho_1 > \rho_2 > \rho_3$.

Багатошарові розрізи – це розрізи з кількістю горизонтів більше трьох. Їх тип встановлюється на основі типізації тришарових розрізів. Для цього записуються типи послідовних погоризонтних тришарових інтервалів багатошарового розрізу. Наприклад, чотиришаровий геоелектричний розріз із співвідношенням опорів $\rho_1 < \rho_2 < \rho_3 < \rho_4$ належить до типу *AA*, адже обидві його послідовні погоризонтні тріади мають тип *A*: $\rho_1 < \rho_2 < \rho_3$ і $\rho_2 < \rho_3 < \rho_4$.

П'ятишаровий розріз $\rho_1 > \rho_2 < \rho_3 > \rho_4 < \rho_5$ слід віднести до типу *НКН*, оскільки $\rho_1 > \rho_2 < \rho_3$ – тип *H*, $\rho_2 < \rho_3 > \rho_4$ – тип *K* і $\rho_3 > \rho_4 < \rho_5$ – тип *H*. Неважко помітити, що індексних літер, якими записується тип багат шарового розрізу, на дві менше від кількості горизонтів.

Довільний багат шаровий розріз із k горизонтів, які мають питомі опори ρ_i й обмежені потужності h_i ($i=1, \dots, k$), характеризується наступними узагальненими параметрами:

1. Сумарна (загальна) потужність:
$$H = \sum_{i=1}^k h_i .$$

2. Сумарна поздовжня провідність:
$$S = \sum_{i=1}^k h_i / \rho_i .$$
 Величина S

вимірюється в сименсах ($\text{См} = \text{Ом}^{-1}$).

3. Сумарний поперечний опір:
$$T = \sum_{i=1}^k h_i \rho_i .$$
 Його величина ви-

мірюється в омах, помножених на квадратний метр ($\text{Ом} \cdot \text{м}^2$).

4. Середній поздовжній опір:
$$\rho_l = H / S = \sum_{i=1}^k h_i / \sum_{i=1}^k h_i / \rho_i .$$

5. Середній поперечний опір:
$$\rho_n = T / H = \sum_{i=1}^k h_i \rho_i / \sum_{i=1}^k h_i .$$

6. Коефіцієнт макроанізотропії:

$$\lambda = \sqrt{\rho_n / \rho_l} = \sqrt{TS} / H = \sqrt{\sum_{i=1}^k h_i \rho_i \sum_{i=1}^k h_i / \rho_i} / \sum_{i=1}^k h_i .$$

Коефіцієнт макроанізотропії шаруватої пачки порід завжди більше 1 ($\lambda > 1$), оскільки середній поперечний опір цієї пачки порід завжди більший від її середнього поздовжнього опору ($\rho_n > \rho_l$).

Примітка: При розрахунку узагальнених характеристик горизонтально-шарового розрізу до поверхні його основи (рис. 1, б) необхідно верхню межу сум, що входять у відповідні вирази, брати рівною $N-1$, тобто $k = N-1$.

Надзвичайно важливе значення мають такі узагальнені характеристики горизонтально-шарового розрізу як його сумарна поздовжня провідність S і середній поздовжній опір ρ_l . Значення S розрізу до поверхні опорного горизонту високого опору

(наприклад, поверхні кристалічного фундаменту) досить тісно корелюється з глибиною H до цієї поверхні. Отже, маючи значення S , які отримують за результатами польової наземної електрометрії, і значення ρ_l , які отримують із параметричних вимірів на свердловинах, можна просто визначити глибину до поверхні високоомного опорного горизонту на рядових точках польових спостережень: $H=S \cdot \rho_l$.

Півпростір, на поверхні якого виконуються виміри електромагнітних полів, як правило, неоднорідний за електромагнітними властивостями. Виділяють одно- дво- та тривимірні його геоелектричні моделі. *Одновимірна модель* – це середовище, в якому електромагнітні властивості є функцією лише однієї просторової координати. Прикладом такої моделі слугує горизонтально-шаровий геоелектричний розріз, властивості якого змінюються лише у вертикальному напрямку. *Двовимірна модель* – це середовище, властивості якого є функцією двох просторових координат. Прикладами такої моделі є досить витягнуті в горизонтальному напрямку структури типу "горсту", "грабена", "скиду" і т. ін. *Тривимірна модель* – це геоелектричний розріз, електромагнітні властивості якого є функцією всіх трьох просторових координат. Прикладом тривимірної моделі може бути геологічне середовище з наявними локальними, близькими до ізометричної форми тілами (рудними високопровідними включеннями чи навпаки включеннями з досить високим питомим електричним опором). Безперечно: чим простіша геоелектрична модель, тим простіше її вивчати методами електрометрії.

2. ЕЛЕКТРИЧНІ ТА ЕЛЕКТРОМАГНІТНІ ПОЛЯ

Електричні та електромагнітні поля, що вивчаються в прикладній електрометрії (електророзвідці), можуть бути природного, незалежного від діяльності людини походження та штучно створюваними за допомогою джерел, контрольованих людиною.

У практичній електрометрії використовують шість основних типів електромагнітних полів, які відрізняються за генетичними ознаками та мінливістю в часі: *постійне поле штучних джерел, постійне природне поле, поле викликаної поляризації, гармонійні та неусталені поля штучних джерел*, а також *природні, змінні в часі поля*, до яких належать *магнітотелуричне, грозових розрядів та природне імпульсне поле*. Зупинимося на характеристиці різних типів електромагнітних полів. При цьому звернемо увагу, перш за все, на *нормальні поля*, під якими в електророзвідці розуміють поля, створювані різними джерелами в однорідному просторі чи півпросторі.

2.1. Постійні електричні та електрохімічні поля

2.1.1. Постійне електричне поле штучних джерел

Постійне електричне поле збуджують в землі джерела постійного струму. Струм подають у землю за допомогою системи заземлень, до яких підводять живлення від сухих батарей, акумуляторів чи генераторів. Найпростіша система складається із двох заземлень A і B , приєднаних проводами до різних полюсів джерела струму. Через електрод A струм подається в землю, а через електрод B – виводиться з неї. Електричне поле, яке створюється в землі, як в об'ємному провіднику, являє собою суперпозицію електричних полів двох різнополярних точкових джерел однакової інтенсивності.

Поле однополярного точкового джерела. Припустимо, що в необмеженому однорідному просторі з питомим опором ρ розташоване точкове заземлення, з якого стікає електричний струм сили I (рис. 2.1, а). Прикладом такого точкового заземлення може бути сферичний металевий електрод малих розмірів.

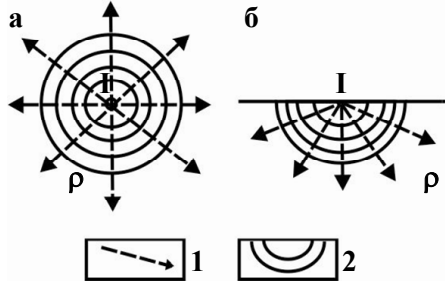


Рис. 2.1. Електричне поле однополярного точкового джерела в однорідному просторі (а) і півпросторі (б): 1 – струмові лінії; 2 – екіпотенціальні поверхні

Напруженість E стаціонарного електричного поля, створеного в провідному просторі однополярним точковим джерелом, виражається через градієнт потенціалу U : $E = -\text{grad}U$. Потенціал електричного поля, у свою чергу, задовольняє рівнянню Лапласа $\Delta U = 0$, яке в сферичній системі координат з урахуванням сферичної симетрії поля (потенціал залежить лише від відстані R точки виміру до точкового джерела) має вигляд:

$$\frac{\partial}{\partial R} \left(R^2 \frac{\partial U}{\partial R} \right) = 0.$$

Розв'язок цього рівняння, з урахуванням згасання потенціалу на нескінченності ($U(R)|_{R \rightarrow \infty} = 0$), і наступне визначення напруженості E приводить до такого результату:

$$U(R) = \frac{C}{R}, \quad E(R) = \frac{C}{R^2},$$

де C – невідома стала.

Для визначення невідомої сталої C скористаємося значенням густини струму, яка, враховуючи рівномірність його розтікання, на будь-якій відстані R від точкового джерела виражається відношенням струму I до площі сфери радіуса R :

$$J = \frac{I}{4\pi R^2}.$$

З іншого боку ця ж густина струму через закон Ома в диференціальній формі виражається:

$$J = \frac{1}{\rho} E = \frac{C}{\rho R^2}.$$

Порівнюючи останні два рівняння, маємо:

$$C = \frac{I\rho}{4\pi}.$$

Отже потенціал U і напруженість E електричного поля однополярного точкового джерела в однорідному просторі мають вигляд:

$$U = \frac{I\rho}{4\pi} \frac{1}{R}, \quad E = \frac{I\rho}{4\pi} \frac{1}{R^2}.$$

Просторова структура нормального електричного поля однополярного точкового джерела досить проста: лінії струму й силові лінії напруженості поля є прямими радіальними лініями з початком у точці джерела (рис. 2.1, а), а ізоповерхнями – поверхнями рівного потенціалу чи екіпотенціальними поверхнями, є поверхні сфер, оскільки лінії напруженості завжди ортогональні ізоповерхням.

При розташуванні точкового джерела на поверхні однорідного провідного півпростору (на границі поділу "земля-повітря") інтенсивність електричного поля в нижньому провідному пів-просторі подвоюється завдяки ідеальним щодо струмових ліній поля відбивальним властивостям ізолятора, яким є повітря (струм I весь розподіляється в нижньому півпросторі). Отже, потенціал і напруженість електричного поля в цьому випадку мають вигляд:

$$U = I\rho/(2\pi R); \quad E = I\rho/(2\pi R^2).$$

Просторова структура поля залишається такою, як і в однорідному просторі. Відмінність полягає лише в тому, що ізоповерхнями будуть поверхні півсфер (рис. 2.1, б).

Електричне поле двох різнополярних точкових джерел
Розглянемо електричне поле двох точкових електродів A і B , розташованих на поверхні однорідного середовища з питомим опором ρ , які живляться струмами $+I$ і $-I$ відповідно (рис. 2.2, а). Така система, яка зав'язана в одне електричне коло (електроди A і B приєднані до різних полюсів одного й того ж джерела), називається *заземленою лінією*. Розмір заземленої лінії $AB = 2l$.

У системі декартових координат із початком у центрі лінії AB , віссю z , направленою вниз, і віссю x , направленою вздовж лінії, потенціал електричного поля в довільній точці нижнього півпростору з координатами (x, y, z) подається у вигляді суми потенціалів полів, створених двома точковими джерелами $+I$ і $-I$:

$$U(x) = \frac{I\rho}{2\pi} \left(\frac{1}{\sqrt{(l+x)^2 + y^2 + z^2}} - \frac{1}{\sqrt{(l-x)^2 + y^2 + z^2}} \right).$$

Дана формула записана з урахуванням того, що у вибраній системі точкові заземлення мають координати $A(-l, 0, 0)$ і $B(+l, 0, 0)$.

Складова напруженості $E_x = -\partial U/\partial x$ має вигляд:

$$E_x = -\frac{\partial U}{\partial x} = \frac{I\rho}{2\pi} \left\{ \frac{l+x}{[(l+x)^2 + y^2 + z^2]^{3/2}} + \frac{l-x}{[(l-x)^2 + y^2 + z^2]^{3/2}} \right\}.$$

На поверхні землі ($z = 0$) потенціал U і напруженість E_x уздовж лінії AB ($y = 0$) можна подати формулами:

$$U(x) = \frac{I\rho}{2\pi} \left(\frac{1}{l+x} - \frac{1}{l-x} \right); \quad E_x(x) = \frac{I\rho}{2\pi} \left(\frac{1}{(l+x)^2} + \frac{1}{(l-x)^2} \right).$$

Графіки зміни $U(x)$ і $E_x(x)$ уздовж лінії AB представлені на рис. 2.2, б. Вони свідчать, що в середній третині лінії AB електричне поле наближається до однорідного (потенціальна функція майже лінійна, а напруженість мало змінюється). Ця область є найбільш сприятливою для вимірів електричного поля.

На рис. 2.2, в зображене згасання паралельної компоненти відносної густини струму $j_x(z)/j_x(0)$ уздовж центральної глибинної осі z при різних розмірах живильної лінії: $AB/2 = l_1, l_2, l_3, l_4$, причому $l_1 < l_2 < l_3 < l_4$. Співвідношення, що описує це згасання, має вигляд:

$$\frac{j_x(z)}{j_x(0)} = \frac{l^3}{[l^2 + z^2]^{3/2}}$$

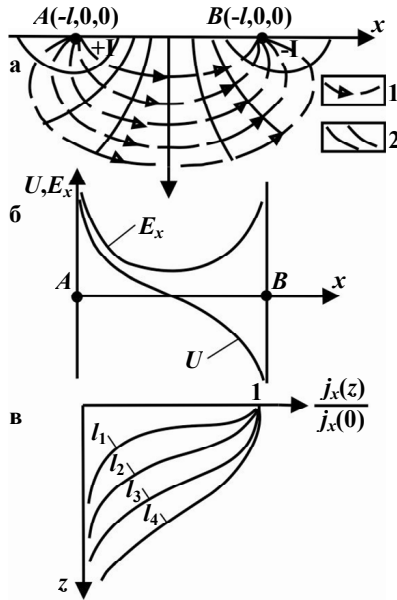


Рис. 2.2. Електричне поле заземленої лінії:

а – схема розташування електродів і структура поля
(1 – струмові лінії, 2 – ізолінії потенціалу);

б – графіки потенціалу U ; в – згасання густини струму з глибиною

Як видно з рисунка, швидкість згасання електричного поля з глибиною залежить від розмірів живильної лінії AB . При менших розмірах поле затухає швидше, ніж при більших. Таким чином, глибинність розповсюдження поля, а отже й глибинність дослідження залежить від розмірів живильної лінії AB . На практиці глибинність дослідження визначається не лише розмірами живи-

льної лінії, а залежить також і від структури геоелектричного розрізу (від співвідношення потужностей й опорів горизонтів). У більшості випадків вона коливається в межах: $z_{ef} \approx (0,25 - 0,1)AB$.

Просторова структура електричного поля, створеного заземленою лінією AB в однорідному півпросторі, більш складна, ніж у випадку однополярного точкового джерела. Лінії напруженості, які є одночасно й струмовими лініями, криволінійні (на рисунку пунктирні лінії), відповідно еквіпотенціальні поверхні не можуть бути поверхнями півсфер.

Електричне поле диполя. *Диполем* в електрометрії називають систему, що складається із двох різнополярних точкових джерел однакової інтенсивності, розташованих на відстані значно меншій за відстань до точки спостережень. Лінія, на якій розташовані полюси диполя, називається його *віссю*, а лінія, що проходить через центр диполя перпендикулярно осі, – *екваторіальною лінією* або *екватором*.

Потенціал електричного поля дипольного джерела, розташованого на поверхні однорідного півпростору, можна отримати із виразу для потенціалу поля заземленої лінії шляхом його граничного перетворення при спрямуванні $l \rightarrow 0$. Для точок виміру, що знаходяться на поверхні півпростору, він має вигляд:

$$U = \frac{IAB\rho}{2\pi} \frac{x}{[x^2 + y^2]^{3/2}} = \frac{IAB\rho \cos \varphi}{2\pi r^2},$$

де AB – розмір диполя, $r = \sqrt{x^2 + y^2}$ – відстань від центра диполя до точки виміру (рознос установки); φ – кут між віссю диполя й радіусом r на точку виміру (полярний кут установки).

Різні компоненти вектора напруженості електричного поля (паралельну E_x , перпендикулярну E_y , радіальну E_r та азимутальну E_φ) отримують шляхом розрахунку градієнта потенціалу:

$$E_x = -\frac{\partial U}{\partial x} = \frac{IAB\rho}{2\pi r^3} (3 \cos^2 \varphi - 1), \quad E_y = -\frac{\partial U}{\partial y} = \frac{3IAB\rho}{2\pi r^3} \cos \varphi \sin \varphi,$$

$$E_r = -\frac{\partial U}{\partial r} = \frac{IAB\rho \cos \varphi}{\pi r^3}, \quad E_\varphi = -\frac{1}{r} \frac{\partial U}{\partial \varphi} = \frac{IAB\rho \sin \varphi}{2\pi r^3}.$$

Зокрема паралельна компонента напруженості електричного поля E_x на осі диполя ($\varphi = 0$) та на екваторі ($\varphi = \pi/2$) має вигляд:

$$E_x|_{\varphi=0} = \frac{IAB\rho}{\pi r^3}; \quad E_x|_{\varphi=\frac{\pi}{2}} = \frac{IAB\rho}{2\pi r^3}.$$

Із наведених співвідношень видно, що інтенсивність паралельної компоненти напруженості на осі диполя у два рази вища за інтенсивність цієї компоненти на екваторі диполя.

Просторова структура електричного поля дипольного джерела в площині поверхні півпростору зображена на рис. 2.3.

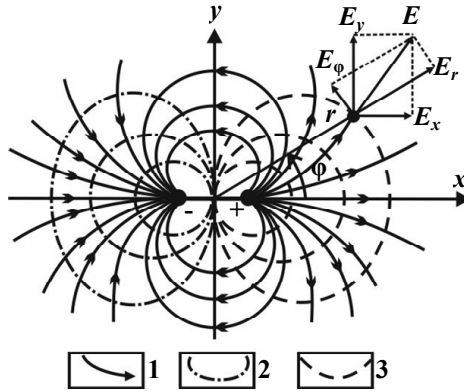


Рис. 2.3. Електричне поле дипольного джерела:
 1 – струмові лінії; 2 – ізолінії від'ємного потенціалу;
 3 – ізолінії додатного потенціалу

Аналіз глибинної залежності густини струму в електричному полі диполя свідчить про те, що зі збільшенням відстані r згасання густини струму з глибиною z уповільнюється. Отже, маємо ситуацію, згідно з якою збільшення відстані r до точки виміру (розносу установки) приводить до зростання глибини проникнення електричного поля, а отже й глибинності дослідження. При цьому доречно зауважити, що на екваторі диполя швидкість згасання електричного поля з глибиною така ж як в електричному полі заземленої лінії AB і водночас суттєво менша (приблизно у два рази), ніж на осі диполя.

2.1.2. Природні постійні електричні поля

Природні постійні в часі локальні електричні поля виникають переважно у зв'язку з *дифузійно-адсорбційними, фільтраційними та окислювально-відновними* процесами, що відбуваються в товщі гірських порід.

Дифузійно-адсорбційні електричні поля виникають на границях розчинів солей із різною концентрацією. При цьому в процесі дифузії іонів з розчину із більшою концентрацією в розчин із меншою виникає різниця потенціалів через різну швидкість їх руху. Від'ємні іони (аніони), як правило, більш рухливі, порівняно із катіонами. У результаті дифузії іонів розчин із пониженою концентрацією набуває заряду, знак якого співпадає зі знаком іона, що має більшу швидкість руху. Величина різниці потенціалів між розчинами NaCl різних концентрацій C_1 і C_2 , причому $C_1 > C_2$, може бути визначена за наступною формулою:

$$\Delta U_{\partial} = 11,6lg \frac{C_1}{C_2} = 11,6 \frac{\rho_2}{\rho_1},$$

де ρ_1 і ρ_2 – питомі електричні опори розчинів. Величина дифузійно-адсорбційних потенціалів не перевищує 15 – 20 мВ.

Фільтраційні електричні поля виникають у гірських породах у результаті фільтрації в них розчинів. Пористу породу можна уявити як таку, що складається з цілої системи капілярів, по яких фільтрується підземна вода. Завдяки адсорбції іонів на твердих стінках капілярів утримуються іони одного знаку (у більшості негативні) і тому утворюється подвійний електричний шар. Усередині капілярів створюється потік "вільних" дифузних іонів іншого знаку (як правило, позитивних). У процесі руху рідини через капіляр (під дією різниці тиску ΔP на його кінцях) у напрямку переміщення води відбувається винос зарядів і виникає різниця потенціалів ΔU_{ϕ} .

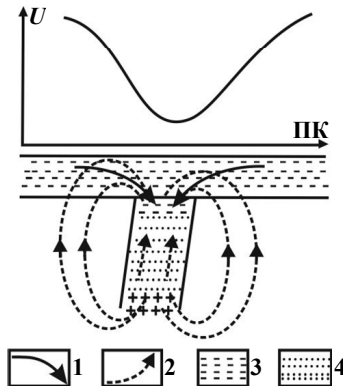


Рис. 2.4. Природне електричне поле в околі фільтрувального пласта:
 1 – напрямок фільтрації підземних вод; 2 – струмові лінії природного поля;
 3 – покривні відклади; 4 – фільтрувальний пласт

Інтенсивність і знак потенціалів фільтрації визначається багатьма факторами. Ділянки надходження води в пласт, в якому відбувається фільтрація, характеризуються негативними аномаліями (рис. 2.4), а місця розвантаження, виходу води – позитивними. Потенціали фільтрації зростають зі збільшенням перепаду тиску, електричного опору води й оточуючих порід, зі зменшенням потужності покривних утворень та глибини залягання водонесних горизонтів. Їх інтенсивність досягає десятків мілівольт.

Окислювально-відновні електричні поля належать до природних електрохімічних полів, які виникають в околі природних електронних провідників, що знаходяться в іонному середовищі. Із природних мінералів до електронних провідників належать більшість сульфідів – халькопірит, пірит, молібденіт та ін., а також графіт, шунгіт, магнетит, піролюзит, антрацит.

Найбільш часто природні електрохімічні поля виникають на родовищах сульфідних поліметалічних та залізних руд, графіту й антрациту. Дослідження свідчать, що на контактних поверхнях рудних тіл з уміщальним середовищем виникає стрибок потенціалу електричного поля. Різниця значень стрибка потенціалів на різних глибинах і різних ділянках рудного тіла є причиною утворення природного електричного поля. Виникнення й

тривале існування цих полів пояснюється різними потенціаловизначальними факторами.

На сульфідних родовищах основними факторами, що спричинюють появу природних електричних полів, є окислювально-відновні хімічні реакції. Верхня частина рудного покладу, як правило, розташована в зоні активної вертикальної циркуляції багатих киснем і вуглекислотою інфільтрованих атмосферних вод. Під їх впливом рудні мінерали окислюються. У нижніх, більш глибоких частинах покладу підземні води застійні, багаті сірководнем, лугами. Тут відбуваються або нейтральні, або відновні хімічні реакції. У зв'язку з тим, що окислювальні реакції супроводжуються вивільненням електронів, а відновні – їх приєднанням, верхня частина рудного покладу набуває позитивного потенціалу, а нижня – негативного. Усередині рудного тіла виникне електричний струм, направлений зверху вниз. В оточуючому рудне тіло середовищі виникне протилежний розподіл електричних зарядів: біля верхньої частини рудного тіла сконцентруються негативні іони (аніони), а біля нижньої – позитивні (катіони). У результаті в зовнішньому середовищі потече струм, направлений знизу вгору (рис. 2.5). Отже, створюється природний гальванічний елемент із постійним електричним полем в оточуючому середовищі.

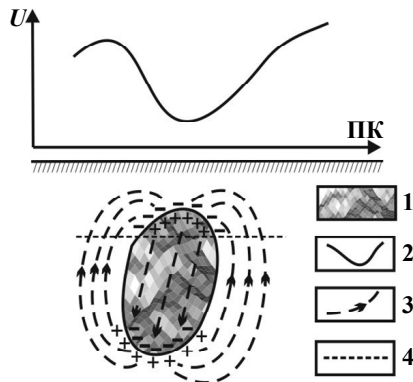


Рис. 2.5. Природне електричне поле рудного покладу:

- 1 – рудне тіло; 2 – графік потенціалу; 3 – струмові лінії;
- 4 – рівень підземних вод

Якщо розчини підземних вод мають високу окислювально-відновну активність і значну концентрацію, то може виникнути природна різниця потенціалів між верхнім і нижнім горизонтами вод, а рудне тіло, яке є хорошим провідником, може слугувати лише для переносу електронів від відновників на глибині до окислювачів зверху, не приймаючи безпосередньої участі в електрохімічних процесах. Так утворюються природні електричні поля в пластах графіту й антрациту, які самі в хімічному відношенні є досить інертними.

Інтенсивність і структура окислювально-відновних полів визначається як рівнем окислювально-відновної активності, так і розмірами рудних тіл, глибиною їх залягання, структурно-текстурними особливостями вміщувальних порід, морфотектонічними, гідрогеологічними й кліматичними особливостями. Амплітуда окислювально-відновних природних електричних полів може досягати значень сотень і навіть 1200 мВ.

2.1.3. Електричне поле викликаної (спричиненої) поляризації

Викликанною поляризацією називають виникнення поверхневих і об'ємних зарядів у гірській породі при пропусканні через неї постійного та низькочастотного змінного електричного струму. Установлено, що спричинена поляризація може виникати лише в багатокомпонентному середовищі, яке складається із твердої речовини та рідини-електроліту. У результаті активізації електрокінетичних та електрохімічних процесів на фазових границях у гірських породах утворюється вторинна електрорушійна сила (ЕРС), яка після вимкнення струму не зникає миттєво. Це вторинне поле й називають полем викликаної (спричиненої) поляризації (ВП або СП). Під час проходження електричного струму воно додається до первинного поляризувального поля й на поверхні землі спостерігається сумарний ефект, а при вимкненні струму відбувається процес спаду поля ВП у "чистому вигляді". Значення поля викликаної поляризації, як і сам процес спаду, залежить від фізичних властивостей гірських порід. Особливо процеси ВП виразно проявляються в зонах розповсюдження сульфідних зруденінь та графітизованих геологічних утворень.

В іонопровідних породах головною причиною виникнення полів ВП є *дифузійні процеси*, зумовлені різною рухливістю іонів в електричному полі та її залежністю від структури порового простору, а також мембранною дією глинистих плівок на іони, явищем електроосмосу, електроємнісними ефектами.

На контактних поверхнях електроліту з електронними провідниками викликана поляризація, зумовлена *електрохімічними процесами*, відомими під назвою *електролітичної поляризації* (процесами, подібними до тих, що відбуваються в акумуляторних батареях під час їх зарядки). Багато гірських порід тією чи іншою мірою вміщують електропровідні мінерали. У цьому випадку ефекти ВП зумовлюються сукупністю відмічених процесів. Після вимкнення електричного струму в штучно поляризованому середовищі відновлюється порушена рівновага, тобто відбувається деполіризація середовища.

При слабких струмах ($j \approx 10\text{--}100 \text{ мкА/м}^2$), що, зазвичай, мають місце в практичній електрометрії, спричинена поляризація лінійно залежить від густини струму j , а її електрорушійна сила $E_{ВП}$ пропорційна напруженості поляризувального поля E :

$$E_{ВП} = \eta E ,$$

де η – коефіцієнт пропорційності, який називається *поляризованістю* гірських порід. Він характеризує здатність гірських порід поляризуватися під час проходження в них електричного струму.

Загальну густину струму j у будь-якій точці середовища, здатного поляризуватися, можна виразити сумою двох протилежних струмів – поляризувального $j_{П}$ та викликаного поляризацією $j_{ВП}$:

$$j = j_{П} - j_{ВП} = (E - E_{ВП}) / \rho = E / \rho^* ,$$

де $\rho^* = \rho / (1 - \eta)$. Таким чином, породи, здатні поляризуватися, можна характеризувати або двома параметрами ρ і η , або одним ρ^* , який можна тлумачити як питомий опір поляризованого середовища. Електричні поля точкового джерела, заземленої лінії та диполі в поляризованому середовищі будуть виражатися такими ж співвідношеннями, як і для неполяризованого з тією лише відмінністю,

що в них, замість ρ , буде фігурувати питомий опір поляризованого середовища ρ^* .

Із формули для $E_{ВП}$ випливає, що

$$\eta = E_{ВП} / E = \Delta U_{ВП} / \Delta U,$$

де $\Delta U_{ВП}$ і ΔU – різниці потенціалів ВП і поляризованого поля відповідно.

Як свідчать експериментальні виміри, ефекти ВП проявляються також і в змінних електричних полях інфраніжньої частоти ($f < 20$ Гц). На частотах, що перевищують 20 Гц, ефекти ВП практично відсутні. Прояв викликаної поляризації виражається в наявності частотної дисперсії питомого електричного опору, що приводить до зсуву фаз між електричним струмом джерела живлення й вимірюваною в поляризованому середовищі напругою.

2.2. Гармонійні електромагнітні поля

2.2.1. Загальна характеристика гармонійних електромагнітних полів

У методах електророзвідки на змінному струмі часто використовують гармонійні поля, тобто поля, характеристики яких (напруженість, густина струму, потенціал) змінюються в часі за законом косинуса чи синуса, наприклад:

$$H = |H| \cos(\omega t - \psi_H); \quad E = |E| \cos(\omega t - \psi_E),$$

де H і E – миттєві напруженості магнітного й електричного полів у фіксований час t ; $|H|$, $|E|$ – максимальні амплітудні значення напруженостей (модулі); $\omega = 2\pi f$ – кругова частота (кількість періодів коливань за 2π секунд); f – частота коливань у Гц ($f = 1/T$, де T – період коливання); ψ_H , ψ_E – початкові фази коливань магнітного й електричного полів.

Основною характеристикою середовища, по якому протікає змінний гармонійний струм і яке має питому провідність γ , абсолютні діелектричну (ϵ) та магнітну (μ) проникності, є комплексне хвильове число k , яке можна подати:

$$k = \sqrt{-i\omega\gamma\mu - \omega^2\mu\epsilon} = b - ia.$$

Примітка: Абсолютна діелектрична та магнітна проникності середовища виражаються: $\epsilon = \epsilon_0\epsilon_r$, $\mu = \mu_0\mu_r$, де ϵ_0 та μ_0 – електрична та магнітна константи, які називаються відповідно абсолютна діелектрична та магнітна проникність вакууму ($\epsilon_0 = 10^{-9}/(36\pi) \approx 8,85 \cdot 10^{-12}$ Ф/м; $\mu_0 = 4\pi \cdot 10^{-7}$ Гн/м); ϵ_r , μ_r – відносні діелектрична та магнітна проникності середовища.

Коефіцієнти b і a хвильового числа називаються відповідно *коефіцієнтом згасання* (або коефіцієнтом поглинання) та *фазовим коефіцієнтом* (або фазовим множником). Вони подаються через наступні співвідношення:

$$a = \omega \sqrt{\frac{\mu\epsilon}{2}} \cdot \sqrt{\sqrt{1 + \text{tg}^2\delta} + 1}, \quad b = \omega \sqrt{\frac{\mu\epsilon}{2}} \cdot \sqrt{\sqrt{1 + \text{tg}^2\delta} - 1},$$

де $\text{tg}\delta = \text{Im}k^2 / \text{Re}k^2 = \gamma / (\omega\epsilon)$ – тангенс кута втрат (параметр, що характеризує рівень енергетичних втрат в електромагнітному полі).

Коефіцієнт згасання b комплексного хвильового числа визначає інтенсивність згасання амплітуди електромагнітної хвилі в напрямку її розповсюдження, а фазовий коефіцієнт a – фазову швидкість розповсюдження електромагнітної хвилі v_ϕ та її довжину λ :

$$v_\phi = \omega / a, \quad \lambda = 2\pi / a.$$

Для *хвильових* електромагнітних полів, у яких тангенс кута втрат значно менший від одиниці ($\text{tg}\delta = \gamma / \omega\epsilon \ll 1$), коефіцієнти b і a хвильового числа, а також фазову швидкість та довжину хвилі можна подати:

$$b = (\gamma/2) \sqrt{\mu/\epsilon}, \quad a = \omega \sqrt{\mu\epsilon},$$

$$v_\phi = v_0 / \sqrt{\mu_r \epsilon_r}, \quad \lambda = \lambda_0 / \sqrt{\mu_r \epsilon_r},$$

де $v_0 = 1 / \sqrt{\mu_0 \epsilon_0} = 3 \cdot 10^8$ м/с – швидкість світла, $\lambda_0 = v_0 T$ – довжина електромагнітної хвилі у вакуумі. В ізоляторі ($\gamma = 0$) коефіцієнт згасання $b = 0$, отже електромагнітна хвиля

розповсюджується без згасання. Необхідно зауважити, що хвильові електромагнітні поля наявні в діелектриках або ж на достатньо високих частотах у слабопровідних середовищах.

Для *квазістаціонарних* електромагнітних полів, у яких тангенс кута втрат значно більший від одиниці ($\operatorname{tg} \delta = \gamma / \omega \varepsilon \gg 1$), маємо:

$$b = a = \sqrt{\omega \gamma \mu / 2}, \quad v_{\phi} = \sqrt{2 \omega \rho / \mu}, \quad \lambda = 2\pi \sqrt{2 \rho / \omega \mu},$$

де $\rho = 1/\gamma$ – питомий опір середовища.

Квазістаціонарні електромагнітні поля – це відносно низькочастотні поля (частота – до перших десятків кілогерц) у відносно провідних середовищах із питомим опором до 1000 – 5000 Ом·м. Більшість методів електророзвідки на змінному струмі використовують квазістаціонарні електромагнітні поля, за винятком досить високочастотних методів, які використовують електромагнітні поля в діапазоні частот від сотень кілогерц до сотень мегагерц. У багатьох випадках ці поля належать до класу хвильових.

Принциповою відмінністю квазістаціонарного поля від хвильового є присутність у ньому частотної дисперсії (залежності від частоти) коефіцієнта згасання b і фазової швидкості v_{ϕ} , що пов'язано із суттєвим переважанням процесів поглинання енергії електромагнітного поля середовищем над процесами її випромінювання.

Для гармонійних електромагнітних полів властиве таке явище як *поляризація*. Вид поляризації поля встановлюється за формою тієї лінії, уздовж якої рухається кінець вектора напруженості поля в просторі за період коливання. Якщо такою лінією є лінія еліпса, то поле має *еліптичну поляризацію*. Коли ж за період коливання вектор напруженості практично не змінює своєї просторової орієнтації, рухаючись уздовж прямої лінії, то таке гармонійне електромагнітне поле має *лінійну поляризацію*.

2.2.2. Плоске гармонійне електромагнітне поле

Найбільш просте за своєю структурою є плоске гармонійне електромагнітне поле. *Плоским полем* називається поле, параметри якого залежать тільки від однієї просторової координати, яка й визначає напрямок його розповсюдження. Дослідження такого електромагнітного поля в однорідному просторі й

пів-просторі свідчить, що вектори напруженості електричної й магнітної складових плоского електромагнітного поля взаємно ортогональні й поляризовані в площині, перпендикулярній напрямку його розповсюдження.

Припустимо, що на поверхню однорідного провідного пів-простору в перпендикулярному до цієї поверхні напрямку падає плоска гармонійна електромагнітна хвиля. Тоді в системі декартових координат, початок якої розташований на денній поверхні, вісь z направлена вертикально вниз, а вісь x – по електричному полю, електрична складова електромагнітної хвилі буде мати компоненту E_x , а магнітна H_y . У будь-якій точці півпростору вони мають вигляд:

$$E_x(z, \omega) = H_y(0)Z e^{-kz}; \quad H_y(\omega, z) = H_y(0)e^{-kz},$$

де $H_y(0)$ – магнітне поле в точках поверхні півпростору; k – комплексне хвильове число; Z – вхідний імпеданс (або просто імпеданс) плоскої гармонійної хвилі, який визначається відношенням взаємно ортогональних складових електричного й магнітного полів:

$$Z = E_x / H_y.$$

Імпеданс у загальному випадку є величиною комплексною, і для однорідного середовища він знаходиться за наступною формулою:

$$Z = \frac{-i\omega\mu}{k},$$

де ω – кругова частота, μ і k – абсолютна магнітна проникність та комплексне хвильове число середовища відповідно, $i = \sqrt{-1}$ – уявна одиниця. Фізична суть імпедансу полягає в тому, що він являє собою комплексний хвильовий опір, який чинить середовище електричному струму, індукованому в ньому.

Для хвильових електромагнітних полів імпеданс є величиною чисто дійсною: $Z = \sqrt{\mu/\varepsilon}$. У вакуумі $Z \approx 377$ Ом.

Для квазістаціонарних електромагнітних полів імпеданс є величиною комплексною й для однорідного середовища має вигляд:

$$Z = \sqrt{-i\omega\rho\mu} = \sqrt{\frac{\omega\rho\mu}{2}} - i\sqrt{\frac{\omega\rho\mu}{2}},$$

де ρ – питомий опір середовища.

Модуль і фаза імпедансу в цьому випадку будуть рівнятися:

$$|Z| = \sqrt{\omega\rho\mu}, \quad \varphi_z = \text{Arg}Z = -\pi/4 = -45^\circ.$$

Із приведеного співвідношення для модуля імпедансу легко бачити, що за умови, коли імпеданс відомий, можна визначити питомий опір півпростору згідно з формулою:

$$\rho = |Z|^2 / \omega\mu.$$

Співвідношення для електричної E_x та магнітної H_y , складових плоскої гармонійної електромагнітної хвилі, свідчать, що поляризація цих складових лінійна, а їх амплітуди можна записати у вигляді:

$$|E_x(z)| = |H_y(0)| \cdot |Z| e^{-bz}, \quad |H_y(z)| = |H_y(0)| e^{-bz}.$$

Із цих співвідношень видно, що плоска гармонійна хвиля в непровідному півпросторі (або повітрі) розповсюджується без згасання, оскільки коефіцієнт згасання $b = 0$, а в нижньому – з експоненціальним згасанням (рис. 2.6). При цьому цілком очевидно, що швидкість згасання залежить від значення коефіцієнта b . Цей коефіцієнт для квазістаціонарних електромагнітних полів залежить від частоти, а отже й глибина проникнення вихрових струмів також залежить від частоти коливань (або періоду чи довжини хвилі). Зі збільшенням частоти (зменшенням періоду коливань чи довжини хвилі) зменшується глибина проникнення електромагнітного поля й, навпаки, збільшення періоду (зменшення частоти) приводить до вповільнення згасання електромагнітної хвилі і, як наслідок, до збільшення глибини її проникнення. Ця властивість поля називається *скін-ефектом*.

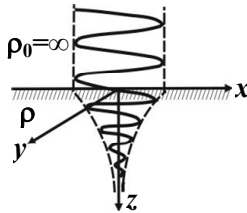


Рис. 2.6. Згасання плоского гармонійного поля з глибиною в провідному півпросторі

Явище скін-ефекту прийнято оцінювати кількісним параметром, який називається *товщиною скін-шару* (h_s). Під цим параметром розуміють довжину інтервала в напрямку розповсюдження електромагнітного поля, на якому його амплітуда зменшиться в $e \approx 2,7$ раз. Із співвідношень для $|E_x(z)|$ і $|H_y(z)|$ цілком очевидно, що $h_s = 1/b$.

Для різних за класом електромагнітних полів потужність скін-шару вираховується:

- для хвильових полів:
$$h_s = 2\rho \sqrt{\frac{\varepsilon}{\mu}} \text{ (м);}$$
- для квазістаціонарних полів:
$$h_s = \sqrt{\frac{2\rho}{\omega\mu}} = \sqrt{\frac{\rho}{\pi f\mu}} = \sqrt{\frac{T\rho}{\pi\mu}} \text{ (м).}$$

Із товщиною скін-шару пов'язують ефективну глибину поширення електромагнітного поля, а отже й глибини досліджень.

2.2.3. Електромагнітні поля локальних джерел

Більш складними за своєю структурою є електромагнітні поля штучних (контрольованих) гармонійних джерел. Існує два типи збудження гармонійних електромагнітних полів – *гальванічний та індукційний*. В обох для збудження застосовують спеціальні генератори змінного струму. При гальванічному способі джерелом-збудником є лінія AB , заземлена на кінцях, в індуктивному – незаземлена контур-петля. І лінія, і петля приєднуються до генератора змінного струму. При малих розмірах лінії AB і контуру-петлі в порівнянні з відстанню до точки виміру ці джерела-збудники являють собою фактично гармонійні *електричний та магнітний диполі*.

При *гальванічному* збудженні в землі протікає електричний струм тієї ж частоти, що й електрорушійна сила (ЕРС) на затискачах генератора та практично з тією ж фазою. Окрім цього, струм у проводах, що з'єднують заземлення A і B з генератором, створює гармонійне магнітне поле, яке індукуює в землі вторинне електричне поле. Останнє, у свою чергу, створює вторинне магнітне поле, зміщене по фазі щодо первинного на $\pi/2$. Таким чином, на поверхні землі реєструється сумарне електричне (гальванічне та індуктивне) і магнітне (первинне й вторинне, спричинене індукованими струмами) поля.

При *індуктивному* збудженні гармонійне первинне магнітне поле, створене незаземленим контуром, індукує електричний струм у землі, який, у свою чергу, зумовлює появу вторинного магнітного поля. У цьому випадку на поверхні землі ресструється суперпозиція первинного та вторинного магнітних полів й індуковане електричне поле.

При розташуванні джерела збудження поля на поверхні провідного півпростору існує два види збудження, що передаються в точку виміру різними шляхами. *Збудження першого роду* – це збудження, яке зумовлене повітряною магнітною хвилею, що розповсюджується від джерела подібно радіохвилі. Вона в кожній точці даної поверхні збурює вихрові електричні струми, які поширюються на глибину. Глибина їх проникнення залежить від частоти завдяки розглянутому вище явищу *скін-ефекту*.

Збудження другого роду розповсюджується безпосередньо від джерела в провідних горизонтах півпростору. У напрямку розповсюдження електромагнітне поле згасає. Швидкість його згасання також залежить від частоти.

Аналіз полів свідчить, що в *ближній зоні* джерела збудження (малі відстані від джерела збудження до точки спостереження та низькі частоти) проявляється значна перевага первинних полів джерел над вторинними індукованими полями. У *дальній зоні* джерела збудження (значні відстані та високі частоти) навпаки – переважають індукційні ефекти.

2.2.4. Радіохвильове поле Землі

Поряд із полями локальних джерел в електророзвідці використовують електромагнітне поле ширококомовних, навігаційних і сигнальних радіостанцій у довгохвильовому (150 – 450 кГц) і наддовгохвильовому (10 – 30 кГц) діапазонах.

Радіостанції випромінюють вертикально поляризовані хвилі. Завдяки відтоку енергії в землю фронт хвилі поблизу границі поділу "земля-повітря" дещо нахилений до горизонту, як наслідок виникає невелика горизонтальна (радіальна) складова електричного поля (рис. 2.7).

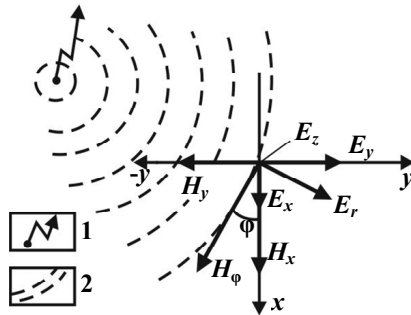


Рис. 2.7. Радіохвильове поле Землі:
1 – джерело радіохвиль; 2 – фронт хвилі

Таким чином, радіохвиля, що розповсюджується вздовж поверхні землі, характеризується складовими E_r , E_z , H_ϕ , (r – напрямком на радіостанцію). Нахил фронту хвилі тим значніший, чим вищий імпеданс $Z = E_r/H_\phi$ провідного півпростору. При експериментальних дослідженнях можна вимірювати горизонтальні компоненти електромагнітного поля та елементи еліпса його поляризації, оскільки електромагнітне поле в цьому випадку має еліптичну поляризацію. Величина модуля імпедансу на частотах наддовгохвильового діапазону дає змогу обчислювати ефективний (позірний) опір ρ_{II} верхньої частини розрізу:

$$\rho_{II} = |E_r/H_\phi|^2 / (\omega\mu).$$

2.3. Неусталене електромагнітне поле

Неусталеним електромагнітним полем називають поле перехідних процесів індукційної природи, які виникають у землі при миттєвій (стрибокподібній) чи імпульсній зміні струму в джерелі збудження. Фізична сутність перехідних процесів полягає в тому, що в провідних середовищах енергетичні зміни електромагнітних полів при їх переході із одного усталеного стану в інший миттєво відбуватися не можуть. Для таких енергетичних змін необхідний певний час, упродовж якого відбувається перехідний процес.

Під час різкої зміни магнітної індукції при миттєвій зміні струму в джерелі збудження (так званому *збудженні за Хевісайдом*) у провідному середовищі утворюється вихрове електромагнітне поле, структура й частотний спектр якого безперервно змінюються в часі й просторі. При використанні для збудження поля локальних контрольованих джерел імпульсне збудження так само, як і у випадку гармонійного електромагнітного поля, передається в точку спостереження двома шляхами – по повітрю (*збудження першого роду*) і по землі (*збудження другого роду*). При цьому на ранній стадії перехідного процесу в частотному спектрі переважають високі гармоніки, тому через скін-ефект вихрові струми концентруються біля поверхні провідного середовища у відносно локальній області. У цей період поле несе інформацію переважно про верхню частину розрізу. Поступово з часом високочастотна частина поля затухає через поглинання енергії середовищем і зростає роль низькочастотних гармонік. Останні мають здатність проникати глибше, а тому несуть інформацію про більш глибокі геоелектричні горизонти.

У добре провідних зонах і об'єктах, наприклад, у рудних тілах, при миттєвій зміні зовнішнього збуджувального магнітного поля також індукуються інтенсивні вихрові струми, які з часом поширюються на більш глибокі області рудних об'єктів і створюють вторинні аномальні нестационарні магнітні поля. Реєстрація перехідних процесів над такими провідними зонами й рудними тілами дозволяє виконувати їх просторове картування.

Такі міркування приводять до очевидного висновку про те, що в перехідних процесах час відіграє роль зондувального параметра, адже зі збільшенням часу зростає глибинність розповсюдження електромагнітного поля. У пізній стадії перехідного процесу локальні електричні струми практично повністю згасають, а неперервна взаємодія магнітних полів нижніх і верхніх горизонтів провідного півпростору приводить до поступового вирівнювання поля з глибиною (збільшується його глибинна однорідність) і рівномірного розподілу струмів у просторі. Тому в геоелектричних розрізах, де підстелений ізолятор, неусталене поле в пізній стадії перехідного процесу буде залежати від сумарної поздовжньої провідності S розрізу (див. п. 1.6).

Тривалість перехідного процесу визначається електричною провідністю γ і магнітною проникністю μ порід, а також відстанню r точки спостереження до джерела збудження. На малих відстанях і в породах із високим питомим опором поле всталоється досить швидко (за десяті й соті долі секунди або навіть швидше). Зі зростанням γ , μ й r тривалість перехідного процесу також зростає. На значних віддальах (у дальній зоні джерела збудження) цей процес може тривати від декількох секунд до десятків секунд, навіть 1 хвилини й більше (у досить добре провідних розрізах).

Отже можна відмітити, що, вивчаючи становлення поля в часі, можна виконувати електромагнітне зондування розрізу, визначати його сумарну поздовжню провідність, а також виявляти в ньому об'єкти з підвищеною чи зниженою провідністю.

2.4. Природні змінні в часі електромагнітні поля

До цих полів належать: магнітотелуричне поле (МТ-поле), поле грозових розрядів та природне імпульсне електромагнітне поле Землі (ПЕМІЗ).

Магнітотелуричним називають природне, змінне в часі електромагнітне поле Землі космічного походження. Спостереження за магнітним полем Землі свідчать, що його величина й напрямок постійно змінюються. Ці зміни отримали назву *варіацій геомагнітного поля*. Розрізняють два види варіацій: варіації, зумовлені внутрішнім джерелом (вікові варіації), і варіації, спричинені зовнішнім джерелом. Перші варіації мають періоди від багатьох років до багатьох століть. Вони пов'язані з процесами, що відбуваються в глибинних шарах Землі – земному ядрі. Геомагнітні варіації, зумовлені зовнішнім джерелом, мають періоди від частин секунди до 11 років. Вони викликані процесами, що відбуваються за межами Землі – у навколосемному космічному просторі.

Згідно із законами електромагнітної індукції варіації геомагнітного поля збуджують у Землі змінне електромагнітне поле, а отже й електричний струм. Величина цього струму тим більша, чим швидше змінюється в часі магнітне поле. Вікові геомагнітні варіації практично не спричиняють появу електричного струму через надто повільну зміну їх у часі. У той же час варіації,

зумовлені зовнішнім джерелом, можуть збуджувати в Землі досить сильні струми, які можна зареєструвати. Ці струми отримали назву *телуричних струмів* (від латинського слова *tellurus* – Земля). Поле геомагнітних варіацій та телуричних струмів і називається *магнітотелуричним полем*.

Природа магнітотелуричного поля тісно пов'язана з процесами, що відбуваються на Сонці. Сонце безперервно викидає в космічний простір потужні потоки заряджених частинок – корпускул, які утворюють так званий *сонячний вітер*. Основна причина збурення геомагнітного поля Землі, за сучасними уявленнями, якраз пов'язана з існуванням сонячного вітру й процесами, що відбуваються при взаємодії сонячного вітру з магнітним полем Землі (з її магнітосферою) та іоносферою Землі.

Існують декілька типів варіацій магнітотелуричного поля. В електрометрії в основному використовуються так звані *геомагнітні пульсації*, що називаються також *короткоперіодними коливаннями* (КПК), із періодом від долей секунди до перших сотень секунд. Короткоперіодні коливання являють собою квазіперіодичні коливання електромагнітного поля, зумовлені складними процесами взаємодії сонячного вітру з магнітосферою. Бувають *стійкі* чи *постійні* (P_c) і *нерегулярні* (*ірегулярні*) *пульсації* (P_i). Перші мають вигляд хвильових пакетів, що швидко йдуть один за одним, тому складається враження безперервного режиму коливань протягом декількох годин. Не дивлячись на обмеженість наших знань про інтенсивність і геометрію джерел пульсацій, ці варіації можуть бути з успіхом застосовані для вивчення геологічної будови Землі. При аналізі варіацій МТ-полів частіше за все застосовують модель плоского електромагнітного поля, що розглянута вище (п. 2.2.2).

Окрім низькочастотних полів космічного походження, у Землі існують електромагнітні поля, що характеризуються відносно високими (3 – 10 кГц) частотами. Їх виникнення спричинене, в основному, *грозовою активністю*. Грозовий розряд між хмарами чи хмарою й землею являє собою типовий електричний диполь великої потужності. Підраховано, що кожную секунду в землю б'є біля 100 блискавок. А тому поле грозових розрядів існує практично постійно. На достатньо великій віддалі від центра грозових розрядів первинне поле можна уявити у вигляді плоскої хвилі, що розповсюджується вздовж земної поверхні.

Виміри параметрів цього поля несуть інформацію про властивості земних надр і використовуються, в основному, при геологічному картуванні.

В останній час значну увагу приділяють вивченню так званих *природних імпульсних електромагнітних полів Землі* (ПЕМПЗ).

Природне імпульсне електромагнітне поле Землі створюється джерелами, зосередженими безпосередньо в літосфері, і доступне спостереженню на відстанях від них від перших десятків метрів до сотень кілометрів у випадку підготовки вогнища сейсмічної події. Джерелами ПЕМПЗ є масиви гірських порід, в яких під дією механічних напруг різного походження відбуваються невідомні деформації зерен мінералів-діелектриків чи капілярів, заповнених електролітом (природною вологою).

Деякими фахівцями висловлюються припущення про два типи механізмів збудження електричного стану геологічного середовища в джерелі: електрична поляризація (виникнення надлишкового дипольного моменту) та електризація (поява надлишкового електричного заряду).

Оскільки в природних діелектриках надлишковий електричний заряд індукує виникнення заряду протилежного знаку, то надлишковий дипольний момент виникає завжди й стан такої поляризації є загальною властивістю джерела ПЕМПЗ. Короткочасна поляризація середовища може виникнути за умов:

а) масового розколювання мінералів-діелектриків, явищ електроадгезії й когезії в зернах, трибоелектризації поверхонь зерен, що зміщуються, виведення електрично заряджених дефектів кристалічної структури на поверхню деформовуваних вільних пор, а також внаслідок ефекту Степанова – електризації зерен мінералів-неп'єзоелектриків при пластичних деформаціях;

б) розриву капілярів, заповнених рідиною, унаслідок чого на поверхні капілярів різко змінюється дзета-потенціал Гельмгольца й гірська порода в цілому змінює стан природної поляризації фільтраційно-адсорбційного походження;

в) інтенсивної фільтрації рідини в капілярах, видавлювання її у вільні пори та інші порожнини при розповсюдженні фронту ударної хвилі (ФУХ), тобто явищ, які також супроводжуються різкою зміною дзета-потенціалів Гельмгольца та іншими порушеннями подвійних електричних шарів на поверхнях поділу фаз діелектрик-електроліт.

П'єзоелектричний та п'єземагнітний ефекти, а також зміни інших видів електричних потенціалів також можуть змінювати свій хід під дією механічних напруг і викликати електромагнітні збурення в середовищі. Ці явища зазвичай пов'язані зі слабкою поляризацією й приводять до варіацій електромагнітних полів, які при вивченні ПЕМПЗ сприймаються як фон, на якому проявляються збурення, пов'язані з невідновними деформаціями.

Стан надлишкової електризації, спричинений у геологічних середовищах механічними напругами, нестійкий і швидко релаксує. Процес релаксації в ближній зоні джерел супроводжується проявами помітних струмів провідності й індукованих ними магнітних полів. У дальній зоні спостерігаються збурення полів хвильового характеру, які важко відрізнити від індустріальних завод, полів радіостанцій, атмосфериків та інших явищ, що розглядаються як завади.

На практиці ПЕМПЗ вивчається, як правило, у ближній зоні. Воно проявляється у вигляді серій (пачок) електромагнітного поля трикутної чи трапецієподібної форми тривалістю 10^{-7} – 10^{-3} с, що швидко приходять одна за одною. Їх амплітуди залежать від відстані точки спостереження до джерела, форми цього джерела, природи геоелектричних процесів, спричинених наявністю в джерелі механічних напруг, інтенсивності й кінетики останніх.

Досвід експериментальних досліджень свідчить, що діапазон спостережуваних амплітуд імпульсів ПЕМПЗ досить широкий: 10^{-6} – 10^{-3} В/м по електричному полю і 10^{-7} – 10^{-4} А/м по магнітному. Кількість імпульсів у секунду може при цьому складати від одиниць до десятків тисяч залежно від їх амплітуд та інтенсивності порушення структурних зв'язків у геологічному середовищі.

Найбільш інтенсивно ПЕМПЗ проявляється в геологічних процесах, що відбуваються поблизу земної поверхні та в значних об'ємах гірських порід. Такі явища наявні частіше за все при наявності зсувних процесів. Завдяки зв'язку доступних для спостереження параметрів ПЕМПЗ із кінетикою зсувних рухів на таких спостереженнях можуть базуватися методи прогнозування та дослідження зсувних явищ. Природні імпульсні електромагнітні поля Землі успішно використовуються також при інженерно-технічному дослідженні територій, відведених під будівництво житлових та технічних споруд.

3. КЛАСИФІКАЦІЯ МЕТОДІВ ПРИКЛАДНОЇ ЕЛЕКТРОМЕТРІЇ ТА ЕЛЕКТРОРОЗВІДУВАЛЬНА АПАРАТУРА

3.1. Класифікація електророзвідувальних методів

У прикладній електрометрії (електророзвідці) налічується більше п'ятдесяти різних методів і модифікацій, призначених як для глибинних досліджень, так і для вивчення верхньої частини розрізу. Через багатоманітність способів електророзвідку можна поділити на класи, групи, методи й модифікації. Усі методи електророзвідки можна поділити на три класи:

1. *Методи профілювання*, призначені для вивчення горизонтально-неоднорідних геоелектричних розрізів і виявлення неоднорідностей у горизонтальному напрямку на приблизно однаковій і постійній глибині.

2. *Методи зондування*, з допомогою яких вивчають горизонтально-однорідні шаруваті геоелектричні розрізи і їх розчленування по вертикалі на певній ділянці профілю.

3. *Підземна (об'ємна) електророзвідка*, в якій об'єднані методи, що вивчають простір між гірськими виробками, свердловинами й земною поверхнею.

Під *методом* розуміємо спосіб електророзвідки, який відрізняється природою досліджуваного поля чи способом його створення, частотним чи часовим діапазоном вимірюваних полів, методикою й технікою виконання робіт, особливостями інтерпретації вирішуваних задач.

Модифікації – це різні варіанти методу електророзвідки, що відрізняються методикою вимірів поля, інколи апаратурою й місцем проведення робіт.

Основні групи та методи електророзвідки, що входять у ці групи, наступні:

1. *Методи постійного струму*, що ґрунтуються на вивченні постійних, а також низькочастотних (до 20 Гц) змінних електричних (рідко магнітних) полів, для яких справедлива теорія постійних полів. До них входять різні модифікації *електричного профілювання* (ЕП) залежно від виду використовуваних установок: симетричні (СЕП), дипольні (ДЕП), комбіновані (КЕП), серединного градієнта (ЕП-СГ), а також *електричного зондування* вертикального (ВЕЗ) та дипольного (ДЗ). Модифікаціями дипольних зондувань з різними установками є: осьові (ДОЗ), екваторіальні (ДЕЗ), азимутальні (ДАЗ), радіальні (ДРЗ) та інші. Методи електричного профілювання та зондування на постійному струмі ще називають *методами опорів*. До групи методів постійного струму можна також віднести такі методи підземної електророзвідки, як метод зарядженого тіла (МЗТ) чи просто заряду (МЗ), точкової та дипольної електричної кореляції (ЕК, ДЕК).

2. *Методи поляризаційні (електрохімічні)*. До цієї групи належить метод природного поля (ПП) чи поляризації самочинної (ПС), який використовує природні електричні поля, що вимірюються не тільки на поверхні, але й у підземних виробках, свердловинах (модифікації ППП і ППС). До цієї групи методів входить також метод викликаної (спричиненої) поляризації (ВП чи СП), що ґрунтується на вивченні штучного неусталеного поля електрохімічної природи. Модифікаціями ВП є: електричні профілювання на постійному (ЕП-ВП) та змінному струмі з вимірами амплітудних і фазових частотних характеристик (ВПЧ, ВПФ), вертикальні електричні зондування (ВЕЗ-ВП), свердловинні спостереження (ВПС). Близькі за природою є контактний і безконтактний способи поляризаційних кривих (КСПК та БКСПК) та метод часткового вилучення металу (ЧВМ).

3. *Методи електророзвідки на змінному струмі*. До цієї групи відносяться методи електророзвідки, що ґрунтуються на вимірах змінних у часі електромагнітних полів. Вони поділяються на такі підгрупи:

а) *Магнітотелуричні методи*, які ґрунтуються на вимірах варіацій (змін у часі) природних електромагнітних полів космічного походження (магнітотелуричних полів). До них

відносяться: магнітотелуричні зондування (МТЗ) та профілювання (МТП), комбінованого магнітотелуричного профілювання (КМТП), методи телуричних струмів (МТС), магнітоваріаційного зондування та профілювання (МВЗ та МВП).

б) Низькочастотні електромагнітні індуктивні методи з контрольованими джерелами, що базуються на вимірах полів контрольованих (штучних) джерел або гармонійних ($f < 10$ кГц), або неусталених, що виникають при імпульсному збудженні. У класі зондувань до них належать частотні електромагнітні зондування (ЧЕМЗ або ЧЗ) та зондування становленням поля (ЗСП або ЗС). У свою чергу метод ЗСП має свої модифікації: зондування становленням поля в дальній і ближній зонах джерела збудження (ЗСДЗ і ЗСБЗ або ЗСД і ЗСБ). Модифікацію ЗСБЗ часто називають зондуванням методом перехідних процесів (ЗМПП). До класу профілювань відносяться методи, що використовують як гармонійні поля – метод довгого кабелю (ДК), незаземленої петлі (НП) та дипольного індуктивного профілювання (ДІП), так і неусталені поля – метод перехідних процесів (МПП).

в) Високочастотні радіохвильові методи. До них належать методи, що використовують високочастотні гармонійні поля (10 кГц $< f < 300$ мГц): радіохвильове профілювання чи радіокомпараційну зйомку на довгих (ДХ-РК) і наддовгих (НДХ-РК) хвилях, метод природного імпульсного електромагнітного поля землі (ПЕМПЗ), радіохвильове зондування (РХЗ) і метод радіо-хвильового просвічування (МРХП). У цю групу входить також імпульсний метод радіолокації (ІМР) чи радіолокаційне зондування (РЛЗ), що використовує імпульсне поле, а також метод георадарної зйомки.

Необхідно зауважити, що багато методів електророзвідки застосовуються в підземних, аеро- та морських (річних) варіантах, що привело до виникнення відповідних модифікацій цих методів.

3.2. Електророзвідувальна апаратура

3.2.1. Способи вимірів електромагнітних полів

У різних методах електророзвідки реєструються штучні чи природні, постійні чи змінні електромагнітні поля. У методах, що ґрунтуються на вивченні штучних полів, використовуються установки

для збудження поля й апаратура для вимірів (реєстрації) полів, що вивчаються. Для виконання робіт методами природного поля, природного імпульсного електромагнітного поля землі та магнітотелуричними необхідна тільки вимірювальна установка.

Електророзвідувальну апаратуру поділяють на *переносну* (портативну) та *електророзвідувальні станції*. Переносна апаратура має невеликі розміри й малу масу, її використовують при вивченні геоелектричного розрізу на невеликих глибинах (до 3 км). В електророзвідувальних станціях вимірювальна апаратура стаціонарно облаштовується на кузові автомобіля, як правило, підвищеної прохідності. У комплект електророзвідувальної станції входить також джерело живлення (генератор), який розміщується на кузові іншого автомобіля.

Виміри електричних сигналів можуть виконуватися *компенсаційним*, *автокомпенсаційним* та *компаративним* способами. Найпростіша схема вимірів, що забезпечує відносно високий вхідний опір вимірювального приладу, компенсаційна. Робота такої схеми зводиться до порівняння вимірюваної різниці потенціалів ΔU із відомою компенсаційною різницею потенціалів $U_k = i_k R_k$. Вона створюється на каліброваному опорі R_k при пропусканні через реостат струму i_k від гальванічного елемента. Момент компенсації фіксується гальванометром при відсутності електричного струму в первинному колі. Нині ця схема вимірів є історією й практично в електророзвідці не використовується.

У практиці електрометричних досліджень часто використовується *автокомпенсаційна схема*, основу якої складає підсилювач із від'ємним зв'язком. У ній компенсація досягається автоматично, а різниця потенціалів визначається шляхом безпосереднього відліку з приладу. Вимірювана різниця потенціалів ΔU подається в первинний контур на вхід підсилювача й послідовно на опір R_k , який під'єднаний як у первинний, так і у вторинний контур цього ж підсилювача. Завдяки глибокому від'ємному зв'язку підсилювача напруга на його виході створює у вторинному контурі такий струм i_k , який забезпечує падіння напруги на опорі R_k , рівне вимірюваній напрузі ($i_k R_k \approx \Delta U$), але протилежне за знаком. Автоматично наступає момент компенсації, а компенсаційний струм i_k , значення якого показує міліамперметр, буде пропорційним вимірюваній напрузі ΔU .

Сутність *компаративного способу* вимірів різниці потенціалів зводиться до порівняння вимірюваної різниці потенціалів із відомою напругою, що виробляється джерелом градууювальної напруги (ДГН) при роботах на постійному струмі чи генератором опорної напруги (ГОН) при роботі на змінному струмі. Подача градууювальної напруги на схему без зміни опорів заземлення й параметрів схеми дозволяє визначити ціну одиниці виміру.

Для створення радіоелектронних електрометричних приладів існують два основних підходи – аналоговий і цифровий. При *аналоговому* підході досліджуваний сигнал підсилюється (частіше за все за напругою), проходить необхідні перетворення (активні й пасивні фільтри, наприклад, RC – ланцюжки, LC – ланцюжки, гіратори, модуляцію-демодуляцію), потім виводиться в аналоговому вигляді на стрілковий індикатор чи осцилограф. Управління апаратурою в цьому випадку також виконується аналоговим способом (змінні резистори, конденсатори й т. п.).

При *цифровому* підході вихідний сигнал цифрується через певні проміжки часу (ці проміжки називаються періодом опитування). Цифрування полягає в зображенні амплітуд вихідного сигналу у двійчатій формі. Усі наступні перетворення сигналу (фільтрація, спектральний аналіз, зберігання інформації) можуть виконуватися за допомогою цифрових елементів (процесори, пристрої зберігання інформації і т. ін.). Управління апаратурою в цьому випадку може здійснюватися за програмно формованими цифровими командами.

Як правило, у сучасній апаратурі обидва ці підходи поєднуються. При вимірах сигнал аналоговим чином підсилюється, інколи фільтрується, потім цифрується. У генераторних установках цифрові команди управляють потужними аналоговими комутувальними (перемикальними) пристроями.

Усю електророзвідувальну апаратуру можна поділити на наступні основні класи: *генератори, датчики поля й вимірювачі*.

3.2.2. Генератори

Більшість методів електророзвідки (ВЕЗ, ДЕЗ, ЕП, ЧЕМЗ, ЗСП) для збудження первинного поля використовують штучні джерела. Основними характеристиками генераторних установок

є наступні: форма збуджуваного сигналу (постійний струм, гармонійний струм, прямокутні імпульси, меандр і т. ін.); тип джерела поля (заземлений електричний диполь, індукційний контур-петля або вертикальний магнітний диполь, антена); максимална сила струму й напруги у вихідному контурі (збуднику поля); робочий інтервал генерованих частот (або часові характеристики генерованих імпульсів); джерело живлення генераторної установки; габаритні розміри апаратури.

У більшості випадків важливо підтримувати якомога більшу силу струму в збуджувальному контурі. Цього можна досягнути методично – зменшуючи опір заземлення, чи апаратурно – змінюючи напругу на виході збудника. Загальна блок-схема генераторних установок зображена на рис. 3.1.



Рис. 3.1. Загальна блок-схема генераторних установок

Перетворювач напруги забезпечує підтримку необхідної напруги у вихідному колі в залежності від зміни параметрів збудника поля через коло зворотного зв'язку (як аналогового, так і цифрового) або за командами з пульта управління. Комутатор забезпечує необхідну форму й частоту вихідного сигналу під керуванням задавального генератора. Збудник поля перетворює електричну енергію в необхідну складову електромагнітного поля – електричну чи магнітну (це безпосереднє джерело поля).

3.2.3. Датчики для вимірів параметрів електромагнітного поля

Датчиком чи первинним вимірювальним перетворювачем називається пристрій, що перетворює значення вимірюваної компоненти електромагнітного поля у вихідний сигнал, зручний для переда-

чі чи реєстрації й функціонально зв'язаний з інформативним параметром вхідного сигналу. Вихідним сигналом частіше за все є напруга, значно рідше частота, тривалість імпульсу, струм і т. ін.

Для реєстрації змінних у часі високочастотних магнітних полів використовуються *індукційні датчики* (ІД), що являють собою багатовиткові котушки з феритовим сердечником, або ж незаземлені контури-петлі чи рамки. На виході цих перетворювачів з'являється індукована змінним магнітним полем в котушках чи рамках електроорушійна сила (ЕРС).

Для реєстрації низькочастотних магнітних полів застосовують *кварцеві магнітометри*. Чутливим елементом магнітометра є магніт із дзеркальцем, що обертається на кварцевій нитці. Світловий потік відбивається від дзеркальця й потрапляє на прозору призму під кутом, що залежить від інтенсивності магнітного поля. Після заломлення в призмі світловий потік попадає на фотодіоди, на яких з'являється різниця потенціалів. Інтенсивність світлового потоку, а отже й значення різниці потенціалів на фотодіодах, залежить від інтенсивності магнітного поля.

Реєстрацію електричного поля виконують за допомогою *заземленої лінії MN (електричного диполя)*. Для усунення впливу власної поляризації електродів застосовуються неполяризовані електроди (мідний стрижень у розчині мідного купоросу або графітовий стрижень у графіті) – електроди, що мають досить малу власну поляризацію (на рівні 1 – 2 мВ). Окрім того, у методах опору з цією ж метою застосовується низькочастотний струм типу меандр.

Для вимірів електричних компонентів змінних електромагнітних полів Землі, крім електричних диполів, можуть застосовуватися безконтактні ємнісні датчики. У датчиків такого типу дуже високий опір. Високочастотне електричне поле може реєструватися за допомогою антен.

3.2.4. Вимірювачі

Це прилади, які призначені для реєстрації електричних сигналів, що з'являються на виході датчиків і функціонально зв'язані з параметрами електромагнітного поля як штучного,

так і природного походження. Загальна схема побудови виміральної апаратури наведена на рис. 3.2.

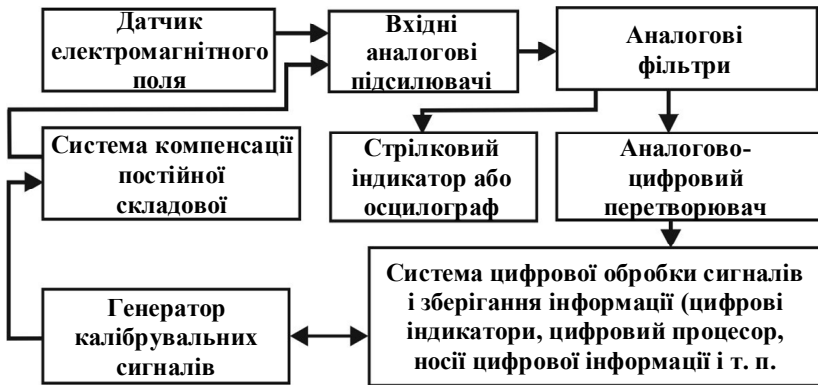


Рис. 3.2. Загальна блок-схема електророзвідувальних вимірювачів

Основні характеристики вимірювачів наступні: форма сигналів та компоненти поля, що реєструються, або тип датчиків; кількість каналів; вхідний опір підсилювачів; чутливість каналів; динамічний діапазон; діапазон частот (чи часових параметрів); наявність вбудованих аналогових фільтрів; тип індикатора (стрілковий, цифровий); для цифрової апаратури – період опитування (частота дискретизації); наявність вбудованих носіїв інформації і їх ємність; можливість автоматизованої обробки даних; джерело живлення.

3.2.5. Спеціалізація апаратури за групами методів

У сучасній електророзвідці вимірвальна апаратура може бути вузько спеціалізована, що пов'язано з особливостями методик вимірів. Виділимо декілька класів апаратури з прикладами конкретних приладів. При цьому немає сенсу наводити їх принцип дії та технічні характеристики, адже методологічні й конструктивні підходи при створенні апаратури, як і технічні показники, весь час змінюються й вдосконалюються.

1. Апаратура, призначена для вимірів *методами постійного струму*: електричного профілювання, зондування та зарядженого тіла (АЭ-72, АНЧ-3, ЭИН-204, ЭРА, ЭРП-1 та ін.). Тут виникає проблема компенсації власних електродних потенціалів. Вона вирішується введенням ручної чи автокомпенсації (АЭ-72, ЭРА, ЭРП-1) або ж роботою на низькочастотному сигналі типу меандр, що не приводить до відчутного впливу індукційних ефектів (АНЧ-3, ЭРА, ЭИН-204, ЭРП-1). Це переносна апаратура.

2. Переносна апаратура, призначена для *електрохімічних методів* ПП та ВП (АЭ-72, ЭРА, ЭРП-1). У цих методах проблема власної різниці потенціалів електродів вирішується застосуванням неполярних електродів.

3. Апаратура, призначена для часових вимірів *неусталених полів* у методах ЗСП (КОД-1) та ВП (КОД-1 генератор 2ПН-225-МУХ і вимірювальна станція СВПУ). Основним способом боротьби із завадами тут є метод накопичення сигналів, при якому завада, як випадкова величина, може бути усереднена й значно подавлена. У цих методах може застосовуватися також потужний генератор УГЭ-50.

4. Апаратура, призначена для *частотних вимірів* в методах ЧЗ (ИН-204, ЦЕС-М, генератор УГЭ-50) та МГЗ (ИН-204, ЦЕС-М). У ній передбачена можливість виділення вузькочастотного діапазону реєстрації шляхом введення аналогових фільтрів.

5. Апаратура, призначена для виконання досліджень у *високочастотних діапазонах* в таких методах як радіокомпараційної зйомки (польовий вимірювач ПВНП, радіоприймач типу СДВР), георадарного зондування (георадар типу ЗОНД-10, ОКО), міжсвердловинного та міжшахтного просвічування (СРП, АММ-ВЧ). Особливістю високочастотної цифрової апаратури є проблема цифрування сигналів, у зв'язку з чим до аналогоцифрових перетворювачів (АЦП) пред'являються досить жорсткі вимоги, а тому вони дорогі й енергоємні.

4. МЕТОДИ ЕЛЕКТРОРОЗВІДКИ НА ПОСТІЙНОМУ СТРУМІ З КОНТРОЛЬОВАНИМИ ДЖЕРЕЛАМИ

Основними методами постійного струму є *методи опорів*, які поділяються на *електропрофілювання* (ЕП) і *електричне зондування* (вертикальне – ВЕЗ і дипольне – ДЗ). Окрім цього, до даної групи належать також підземні, об'ємні чи шахтно-свердловинні методи – *зарядженого тіла (заряду)*, *занурених електродів*, *електричної кореляції* та ін. У даній групі штучних методів електророзвідки використовуються не тільки постійні поля, але й змінні низькочастотні ($f < 20$ Гц), для яких при малих розмірах установок справедлива теорія постійних полів.

Суть методів опорів (ЕП, ВЕЗ, ДЗ) зводиться до визначення позірних опорів шляхом виміру різниці потенціалів на приймальних електродах і сили струму в живильній лінії. Із розв'язку прямих задач для стаціонарних електричних полів різних джерел над однорідним провідним півпростором впливають формули для визначення його питомого опору ρ . У методах опору за цими ж формулами розраховується позірний опір ρ_{II} , що характеризує аномальне поле, зумовлене неоднорідною будовою півпростору.

Позірний опір ρ_{II} неоднорідного середовища – це дійсний питомий опір такого фіктивного однорідного ізотропного середовища, в якому при заданій геометрії розташування живильних (A і B) і приймальних (M і N) електродів і сили струму I на приймальних електродах створюється різниця потенціалів ΔU , рівна вимірній в неоднорідному середовищі. Позірний опір ρ_{II} має розмірність омметр (Ом·м) і визначається за формулою:

$$\rho_{II} = K \cdot \Delta U / I,$$

де I – величина струму, що пропускається в землю через живильні електроди A і B , ΔU – різниця потенціалів, яка зареєстрована між вимірювальними електродами M і N у момент проходження струму; K – коефіцієнт установки (геометричний коефіцієнт, який вимірюється в метрах). У випадку довільного розта-

шування живильних і приймальних електродів коефіцієнт установки визначається:

$$K = 2\pi / (1/AM - 1/AN - 1/BM + 1/BN),$$

де AM, AN, BM, BN – відстані між відповідними електродами.

Позірний опір підпорядковується *принципу взаємності*, який формулюється наступним чином: величина позірного опору, виміряного будь-якою чотирьохелектродною установкою, залишається без зміни, якщо приймальні й живильні електроди поміняти місцями.

Методами *електричного зондування* вивчається залежність позірного опору від розносу установки, яким регулюється глибинність дослідження. Таким чином, маючи дистанційну залежність позірного опору (криву зондування), можна отримати інформацію про зміну електричних властивостей геоелектричного розрізу з глибиною. Отже, основною задачею електричних зондувань є вивчення залежності питомого опору порід із глибиною, і на цій основі розчленування геоелектричного розрізу на окремі горизонти, що різняться за питомими опорами. Для методів електричних зондувань найбільш сприятливим геоелектричним розрізом є горизонтально-шаровий або близький до нього.

Основною задачею *електричного профілювання* є дослідження зміни електричних властивостей геоелектричного розрізу в горизонтальному напрямку (по латералі), причому на приблизно одному й тому ж глибинному рівні. Вирішення цієї задачі досягається вимірами позірного опору установками, які переміщуються по профілю без зміни їх геометрії, тобто розносу. Зрозуміло, що для електричного профілювання найбільш сприятливою моделлю розрізу є вертикально-шарова або близька до неї.

4.1. Вертикальне електричне зондування

Вертикальне електричне зондування (ВЕЗ) виконується симетричною чотирьохелектродною установкою $AMNB$, в якій $MN \leq 1/3AB$. Ця модифікація методу опорів була запропонована французьким вченим К. Шлюмберже на початку 20-х років ХХ сторіччя. Вона й тепер залишається однією з найпоширеніших в

електрометричній практиці при вирішенні геологозйомочних, геолого-пошукових, інженерно-геологічних, гідрогеологічних та екологічних задач.

4.1.1. Монтажна схема польової електрометричної установки

Монтажна схема установки $AMNB$ для роботи методом ВЕЗ із малими розносами показана на рис. 4.1.

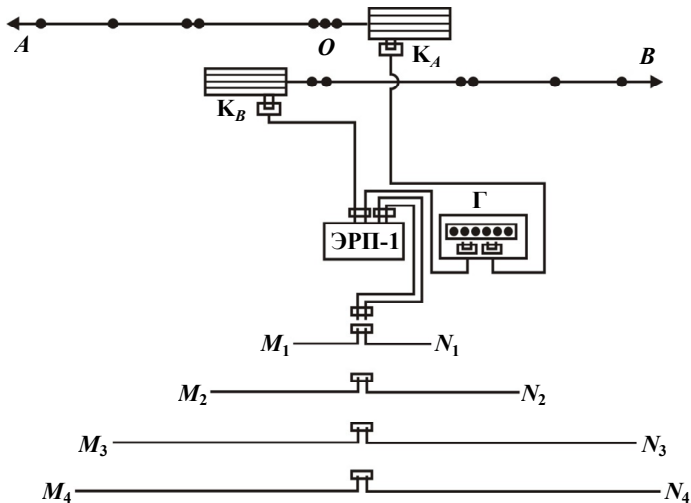


Рис. 4.1. Монтажна схема установки для зондувань з малими розносами:

ЭРП-1 – вимірювач, Г – генератор,

K_A й K_B – котушки із проводами живильної лінії

Кожна котушка лінії живлення вміщує до 1000 м проводу. Послідовне збільшення розносів живильних заземлень A і B здійснюється шляхом розмотування проводів із котушок. Необхідні величини розносів встановлюються по "мітках" на проводах, відстані від яких до початкової мітки від зовнішнього кінця проводу дорівнюють відповідним піврозносам живильних заземлень. За допомогою двох котушок, розташованих у центрі

установки, можна виконати зондування з максимальним розносом живильних заземлень до 2000 м.

Для роботи з великими розносами на кінцях проводів, розмотаних із центральних котушок, установлюють другу пару котушок. Розмотуючи провід із цих котушок і приєднуючи їх до вже розмотаного проводу, виконують виміри на розносах AB до 4000 м.

Поступове збільшення розносів AB викликає зменшення різниці потенціалів між заземленнями приймальної лінії MN за рахунок геометричного згасання поля, і вимір ΔU стає досить малим. Тому після деякого розносу AB переходять до вимірів із більшим розносом вимірювальних заземлень. При цьому відношення MN/AB не повинно перевищувати $1/3$. В установці є декілька вимірювальних ліній, кількість яких визначається величинами максимальних розносів AB .

Розноси AB вибираються таким чином, що кожен наступний рознос збільшується щодо попереднього приблизно в півтора раза. Це забезпечує рівномірне розташування точок графіка ВЕЗ на логарифмічній сітці логарифмічного бланка, на якому будується залежність позірною опорю від піврозносу живильної лінії. Рекомендована послідовність зміни розносів AB і система маркування проводів приведені в табл. 4.1.

Таблиця 4.1

Параметри польової установки ВЕЗ

$AB/2,$ м	$MN/2,$ м	К-сть міток	$AB/2,$ м	$MN/2,$ м	К-сть міток	$AB/2,$ м	$MN/2,$ м	К-сть міток
1	0,2	1	6	0,6	3	30	10	1
1,25	0,2	2	8	0,6	1	40	3	2
1,6	0,2	3	10	0,6	2	40	10	2
2	0,2	1	10	3	2	50	10	1
2,5	0,2	2	12	0,6	3	65	10	2
3	0,2	3	12	3	3	80	10	3
3	0,6	3	16	3	1	100	10	1
4	0,2	1	20	3	2	125	10	2
4	0,6	1	25	3	3	150	10	3
5	0,6	2	30	3	1			

При монтажі польової установки треба керуватися схемою, зображеною на рис. 4.1. У процесі монтажу необхідно виконати наступні операції:

1. Підготувати лінію живлення. Для цього відміряти два відрізки проводу марки ГПСМПО (геофізичний провід зі сталемідною струмопровідною жилою перетином $1,0 \text{ мм}^2$ в ізоляції з поліетилену полегшеного) по 153 м кожний. Для цього на полі або біля прямої ділянки дороги встановити в ряд дві котушки з проводами на підставках. Відступивши на 1 м від кінців проводів, установити на них початкові мітки. Від цих міток на двох проводах за допомогою мірної стрічки відміряти відстані, рівні відповідним розносам $AB/2$, і відзначити ці відстані мітками, керуючись табл. 4.1. Відстані мають вимірюватися від середини одиночної мітки, від середини проміжку подвійної мітки й від центру середньої мітки в потрібній мітці.

На двох відрізках проводу залишити вільні кінці довжиною 2 м. Ці кінці просмикнути в отвори сердечників катушок, закріпити їх на сердечниках вузлами й підключити до гнізд ебонітових панелей, розташованих на "щочах" катушок. Після цього змотати провід на катушки; початкові (нульові) мітки при цьому будуть зовні. Під час змотування проводу потрібно уважно його оглядати й усі виявлені пошкодження ізоляції ретельно усувати. При змотуванні стежити, щоб проводи лягали на сердечники катушок рівними рядами.

На зовнішні кінці проводів надягти наконечники зі штирями. Катушки позначити (наприклад, A_1, A_2, B_1, B_2).

2. Приймальні лінії виготовляються у вигляді "коси". Підготувати проводи вимірювальних ліній. Для цього із проводу марки ПСРП або ГПСМПО відміряти: два відрізки по 3,2 м, два – по 3,6 м, два – по 6 м, два – по 13 м. На кожному відрізку, відступивши на 2,5 м від кінця, поставити початкову мітку (2,5 м проводу для шлейфу приймальної лінії). З іншого кінця відрізків проводів відміряти по 0,5 м і поставити кінцеву мітку (0,5 м проводу для приєднання приймальних електродів). Перевірити відстані між мітками. Вони повинні віповідати прийнятим розмірам $MN/2 = 0,2; 0,6; 3$ й 10 м для кожної пари проводів (табл. 4.1).

Однакові відрізки зв'язати попарно біля початкових міток; зовнішні кінці зачистити від ізоляції й зробити вилки для приєднання до електродів, а на внутрішні (зв'язані) кінці надягнути вилку для з'єднання з гніздами приладу. На виводах написати величину відповідного розносу $MN/2$. Сплести приготовлені приймальні лінії в "косу", яку намотати на загальну котушку.

Монтаж вимірювальних ліній показаний на рис. 4.2, а.

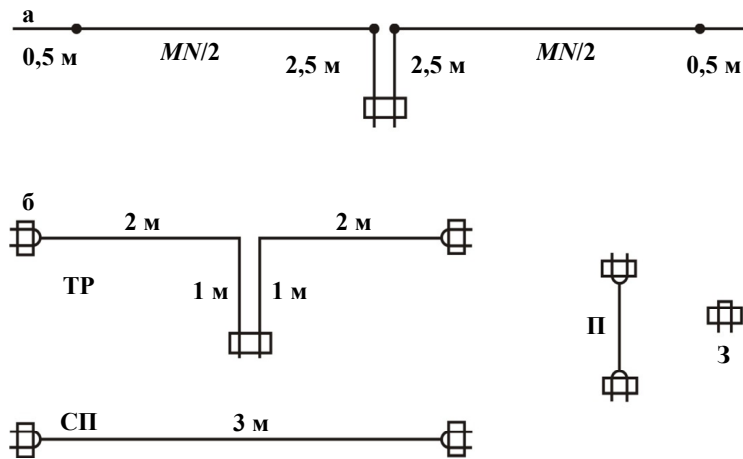


Рис. 4.2. Монтаж установки для ВЕЗ:

а – вимірювальні лінії, б – допоміжні з'єднання
(ТР – трійник, СП, П – перехідники, З – закоротка)

3. Виготовити заземлення живильних і приймальних ліній. Заземлення лінії живлення виготовляються із залізних електродів. Електроди з'єднати відрізками проводу у зв'язки по три; до крайніх електродів двох зв'язок приєднати короткі відрізки проводу з надягнутою вилкою, що має гнізда для підключення до лінії живлення. До інших зв'язок приєднати відрізки проводу без вилок довжиною 1 – 2 м, щоб на великих розносах, при необхідності, мати можливість скласти заземлення з 4-х чи більшої кількості електродів.

Заземлення приймальних ліній виготовляються з мідних електродів – по одному електроду в кожному заземленні.

При виготовленні заземлень варто керуватися правилами, що містяться в додатку А.

4. Підготувати допоміжне з'єднання: трійник ТР для приєднання генератора до лінії живлення. Допоміжне з'єднання виготовляється з м'якого проводу, керуючись розмірами, показаними на рис. 4.2, б.

4.1.2. Методика польових робіт

Польові операції включають: а) підготовку установки до роботи; б) вимірювання позірного опору; в) зміну розносу AB .

Підготовка установки до роботи починається з того, що в точці, наміченій для виконання ВЕЗ, забивається пікет, який фіксує положення центра установки. На ньому пишуться номери ВЕЗ, пікета й профілю. По бусолі намічається напрямок для розносу живильних і вимірювальних заземлень, вибираються місцеві орієнтири, що фіксують цей напрямок.

Після того як апаратура й устаткування перевезені до місця роботи, підготовлюються вимірювальні лінії. Вони розташовуються паралельно до лінії живлення. Для зменшення впливу індуктивних наведень і витоків струму провід лінії живлення відносять на 2 – 5 м від приймальної лінії MN . Щоб витримати розміри розносів, проводи ліній натягують, тримаючи вузол із початковими мітками біля центрального пікету, і забивають електроди біля кінцевих міток.

Після закінчення розмотування вимірювальних ліній приступають до підготовки лінії живлення. Котушки K_A і K_B встановлюють на станках з обох боків від центра O (див. рис. 4.1), стежачи за тим, щоб проводи при розмотуванні сходили з верхніх кромek котушок назустріч один одному, після чого підготовляють перший рознос ($AB/2 = 1$ м). Для цього розмотують провід із котушок у протилежні від центра сторони доти, поки інші одиночні мітки, що відповідають першому розносу, на обох проводах не виявляться над центральним пікетом. Розмотування припиняють, обидві мітки притискають до пікету, натягають провід і забивають заземлення A і B біля початкових міток, що знаходяться на кінцях проводів.

Живильне заземлення являє собою декілька паралельно з'єднаних металевих електродів. При малих розносах на кожному заземленні забивається по одному електроду, а інші кладуться на землю поруч. Надалі при збільшенні розносів забиваються два, потім три й більше електродів. На великих розносах ліній живлення, де кожне заземлення складається з декількох електродів, з'єднаних паралельно, ці електроди забиваються по лінії, перпендикулярній до напрямку розносів, на відстані один від одного не менше 2- або 3-кратної довжини забитої в землю частини електрода. Після цього електроди приєднують до проводів живильних ліній.

При малих розносах установки необхідно особливо ретельно стежити за витриманням розмірів розносів і розташуванням електродів строго по прямій лінії, оскільки порушення симетрії встановлення й перекручування розносів викликають значні похибки при визначенні величини позірною опорю $r_{\text{п}}$.

Після того як електроди забиті, вимірювач (ЭРП-1) встановлюють на підставку з ізоляційним килимком біля центра. Праворуч від нього на гумовий килимок ставлять генератор і приєднують його до вимірювальної установки. Для цього двополосну вилку трійника вставляють у гнізда "AB" генератора, другу його вилку (однополосну) приєднують до панелі котушки K_A , а третю – до панелі котушки K_B . При вимірах при малих розносах використовують малі струми генератора. Збільшення струму генератора проводиться в процесі зондування відповідно до вказівок, поданих нижче.

Вилка вимірювальної лінії $MN/2 = 0,2$ м приєднується до гнізд вимірювача "MN".

Перед польовими вимірами оператор виконує перевірки приладу. Потім вимірює різницю потенціалів ΔU між вимірювальними заземленнями M і N і силу струму I в контурі живлення AB . За виміряними значеннями ΔU і I обчислювач підраховує $r_{\text{п}}$. При цьому дотримуються наступних вимог:

1. Вимір ΔU виконується перед відповідним виміром сили струму I .
2. Щоб уникнути порушення контактів електродів із землею, а також відповідно до вимог техніки безпеки працюючі під час вимірів повинні знаходитися від заземлень на відстані не менше 2 метрів.

3. Виміряні оператором величини ΔU й I повідомляються обчислювачеві, який перед записом у журнал зобов'язаний повторити їх оператору, щоб останній міг переконатися в тому, що обчислювач правильно його зрозумів. Запис ведеться в спеціальному польовому журналі, форма якого наведена нижче.

Ділянка – "Західна". Дата – 28.05.2011. Ясно, сухо.
Профіль – III. Початок спостережень – 7 год 15 хв.
Пікет – 12. Кінець спостережень – 8 год 20 хв.
Оператор – Касьяненко В. С. Обчислювач – Вабіщевич О. Г.

№ заміру	AB/2, м	MN/2, м	K, м	$\Delta U, мВ$	I, мА	$\rho_{П},$ Ом·м	$\rho_{П\text{ сер}},$ Ом·м	Примітки
1	1	0,2	7,54	254	2	958		
2	1,25	0,2	11,95	125	2	747		

Оператор _____ Обчислювач _____
 (підпис) (підпис)

За виміряними значеннями ΔU й I обчислювач розраховує значення позірного опору $\rho_{П}$. Результати вимірів та розрахунків записуються в журнал і зображуються графічно на подвійному логарифмічному бланку модуля 6,25 см у вигляді залежності позірного опору $\rho_{П}$ від піврозносу установки AB/2 (рис.4.3). Ця залежність називається *кривою ВЕЗ*. У графі "Примітки" обчислювач замальовує абрис місцевості точки зондувань, відзначає фактори, що можуть вплинути на величину позірного опору та на умови вимірів – заболоченість, відвали порід, гірські виробки, описує характер рослинного покриву, результати перевірок установки й т. ін. Журнал польових спостережень повинен бути підписаний оператором й обчислювачем, а після його перевірки – начальником геофізичного загону.

Обчислення $\rho_{П}$ виконується за формулою:

$$\rho_{П} = K \frac{\Delta U}{I},$$

де K – коефіцієнт установки.

Для симетричної установки

$$K = \pi \frac{AM \cdot AN}{MN},$$

де AM , AN , MN – відстані між відповідними заземленнями.

При вимірюванні різниці потенціалів і сили струму автокомпенсатором АЭ-72, в якому струм вимірюється в сА, а напруга в мВ, коефіцієнт установки розраховується за формулою:

$$K = \pi \frac{AM \cdot AN}{10 \cdot MN}.$$

При вимірюванні сучасною апаратурою типу ЭРА, ЭРП-1 при визначенні коефіцієнта K ділення на 10 виключається, оскільки струм I вимірюється в мА.

Для контролю за роботою оператора й перевірки установки на витік струму виміри на одному й тому ж розносі повторюються при силі струму, змінений не менше ніж на 25%. Зазвичай у виробничих партіях повторні виміри виконуються тільки при розносах $AB/2$ більших 500 м, а на менших – лише в точках різкої зміни ходу кривої зондування й при ΔU меншій 2 мВ. Однак у період навчальної практики повторні виміри доцільно проводити на кожному розносі.

Зміна сили струму при повторних вимірах виконується тільки шляхом зміни опору живильних заземлень A і B . Найчастіше це здійснюється висмикуванням із землі частини електродів (якщо їх забито декілька) чи частковим зменшенням (або збільшенням) заглиблення одиночного електрода (при малих розносах). Для цього оператор подає працюючим на заземленнях команду. Переконавшись, що команда виконана, оператор повторює виміри, а обчислювач, записавши дані в журнал, підраховує друге значення ρ_{II} . Різниця між обома значеннями ρ_{II} не повинна перевищувати $\pm 5\%$ при зміні сили струму не менше ніж на 25%. Розбіжність понад 5% свідчить або про неприпустимі похибки у вимірах, або про наявність витоків в установці. При значних розбіжностях виміри повторюються, причому всі вони повинні проводитися при інших значеннях сили струму, для чого щораз змінюють опір заземлень.

За двома значеннями ρ_{II} обчислювач розраховує середнє значення, записує його в журнал і наносить точку, що відповідає цьому значенню, на логарифмічний бланк (див. рис. 4.3).

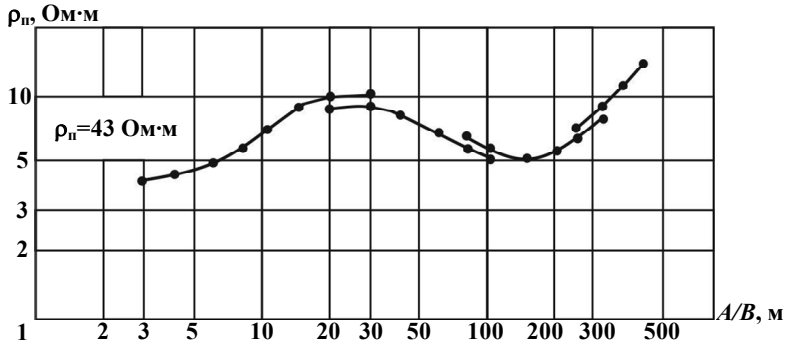


Рис. 4.3. Крива ВЕЗ

Зміна розносів виконується за командою оператора "вперед", яка подається голосом, а при розносах живильних заземлень, що перевищують 100 – 200 м, за допомогою польового телефону або радіостанції. Одержавши цю команду, працівник на центрі відключає від котушок вилки допоміжних з'єднань, працівники на електродах A і B виймають із землі електроди й тягнуть провід у наміченому напрямку. Працівник на центрі стежить за мітками й затримує провід, як тільки з'являється чергова мітка. Мітки обох проводів притискають до центрального пікету, працівники на електродах A і B натягають проводи, біля початкових міток забивають електроди й голосом або по зв'язку доповідають про готовність лінії. Центровий працівник підключає генератор (батарею) і вимірювальний прилад до котушок, після чого оператор робить виміри ΔU й I .

У такому ж порядку виконується все зондування. Перехід на кожний наступний рознос живильних електродів здійснюється лише після того, як обчислювач переконається, що отримана при даному розносі точка на графіку зондування не порушує плавного ходу кривої.

При виконанні електричних зондувань з "великими" розносами ($AB > 2000$ м) дослідження виконуються наступним чином: коли центральні котушки розмотані й виміри на розносі $AB/2 = 1000$ м виконані, на кінцях ліній живлення ставлять по другій котушці з підставками. Один працівник розмотує провід із цієї котушки вздовж лінії зондування, а другий стежить за мітками й включає котушку в лінію. Між собою і з оператором працівники зв'язуються за допомогою радіо- або телефонного зв'язку.

У процесі вимірювань збільшення розносів AB приводить до зменшення вимірюваної різниці потенціалів. Тому підвищення амплітуди вимірюваного сигналу можливе за рахунок збільшення напруги батарей живлення (підключення більшої кількості батарей) або ж покращення якості заземлень: їх більшим заглибленням чи збільшенням кількості електродів заземлень. Крім того, може бути збільшена довжина лінії MN . Для цього оператор дає відповідні вказівки працівникам.

Після закінчення зондування, яке фіксується тоді, коли три точки на кривій ВЕЗ знаходяться на асимптоті – прямій лінії, нахиленій під кутом 45° , у журнал заносяться місце розташування центра зондування, азимут розносів, дата й погода під час роботи, прізвища оператора й обчислювача. Потім установка розбирається й усе устаткування перевозиться на нову точку.

При побудові кривої ВЕЗ сусідні точки, отримані з однаковим розносом приймальних заземлень, з'єднуються прямою лінією в окремий відрізок, унаслідок чого вся крива ВЕЗ складається із сукупності відрізків (рис. 4.3). Щоб забезпечити перекриття відрізків кривої ВЕЗ при переході від однієї приймальної лінії до іншої, виміри з обома приймальними лініями MN виконуються на двох суміжних розносах живильної лінії AB . Розбіжності між значеннями ρ_L , отриманими на різних приймальних лініях при однакових розносах AB , не повинні перевищувати 10 – 15 %. Значні розбіжності пов'язані, як правило, із наявністю горизонтальних неоднорідностей в околі точки ВЕЗ, а тому в цьому випадку необхідно змістити положення центра ВЕЗ і повторити все зондування.

Крива позірною опору якісно відображає зміну питомого опору розрізу по вертикалі. Горизонти підвищеного й зниженого опору на кривій ВЕЗ теж відмічаються підвищеними та зниже-

ними значеннями. Криві електричного зондування є основною вихідною інформацією, яка підлягає кількісній інтерпретації по визначенню питомих опорів і товщин горизонтів.

Для вивчення анізотропних в електричному відношенні порід – сланців, тріщинуватих вапняків, тріщинуватих обводнених зон у кристалічних породах та інше – виконуються багатоазимутальні вертикальні електричні зондування при орієнтації установки в різних азимутах на точці спостережень. За результатами багатоазимутальних ВЕЗ будується серія полярних діаграм позірного опору для різних фіксованих розносів. Такий вид робіт називається *круговим вертикальним зондуванням (КВЗ)*. Частковим випадком КВЗ є хрестові зондування, коли на одній точці виконують два вертикальні електричні зондування з орієнтацією установки вздовж двох взаємно перпендикулярних напрямків.

4.1.3. Обробка результатів польових спостережень

Кінцевою задачею обробки результатів вертикального електричного зондування є представлення польових матеріалів у вигляді, придатному для їх якісної й кількісної інтерпретації, а також оцінка якості польових матеріалів. Слід відзначити, що більшість операцій з обробки даних виконуються на ЕОМ, однак деякі із них на навчальній практиці можуть виконуватися вручну для глибшого засвоєння матеріалу.

Для обробки польових матеріалів, отриманих у процесі електричних зондувань, проводять наступні операції:

1. Перевірка обчислення ρ_L у польовому журналі в "другу руку".
2. Побудова польових кривих ВЕЗ на прозорих логарифмічних бланках.
3. Побудова профілів кривих ВЕЗ. Точки зондування наносять на профіль і над (чи під) кожною точкою будують криву ВЕЗ таким чином, щоб вісь опорів була горизонтальною, а вісь розносів – вертикальною.
4. Крім профілю кривих ВЕЗ, будують карти та графіки опорів для окремих розносів, значення ρ_L на яких найбільш характерні для особливості розрізу. Вибір розносів для побудови карти й графіків залежить також від глибинності досліджень.

Для побудови карти опорів точки ВЕЗ наносять на план, біля них виписують значення ρ_{Π} на обраному для складання карти розносі $AB/2$ і в отриманому в такий спосіб полі чисел звичайними прийомами інтерполяції проводять лінії рівних значень позірнього опору (ізооми). Перетин ізоом вибирається в залежності від діапазону зміни чисельних значень ρ_{Π} . При наявності персонального комп'ютера ці побудови виконують за допомогою пакета програм Surfer.

Часто для більшої наочності карти ізоом зони між ізолініями зафарбовують різними кольорами або різним чином заштриховують. На карту варто наносити основні елементи ситуації, наявні геологічні дані та результати геологічної інтерпретації електророзвідувальних даних.

5. Для якісної інтерпретації результатів зондувань карту зручно виконувати, користуючись так званим "вертикальним розрізом позірних опорів" (вертикальною картою ізоом). Для побудови зазначеного розрізу на профіль, уздовж якого проводилися зондування, наносять точки ВЕЗ і в кожній точці вздовж вертикальної прямої на глибині, рівній половині розносу лінії живлення, виписують значення ρ_{Π} , отримане при даному розносі. Така операція виконується для кожного піврозносу всіх ВЕЗ, виконаних на даному профілі. В утвореному полі чисел проводяться ізолінії – ізооми (рис. 4.4).

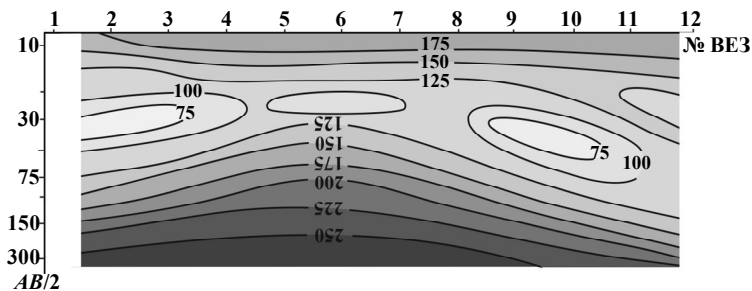


Рис. 4.4. Вертикальний розріз позірних опорів

Так само, як і для карти ізоом, описаної вище, перетин ізоліній на вертикальному розрізі вибирають залежно від діапазону зміни ρ_{Π} на профілі. Конфігурація вертикальної карти ізоом якісно відбиває поведінку опорних електричних горизонтів.

4.1.4. Інтерпретація кривих ВЕЗ

Криві ВЕЗ та їх властивості. При будь-якому геофізичному методі для розробки системи кількісної інтерпретації експериментальних даних необхідно мати розв'язання прямої задачі в рамках якоїсь формалізованої моделі. Для методу ВЕЗ пряма задача полягає в отриманні алгоритму розрахунку кривих ВЕЗ для горизонтально-шарової моделі геоелектричного розрізу з довільною кількістю горизонтів.

Розв'язок прямої задачі електричного зондування ґрунтується на визначенні напруженості електричного поля точкового джерела на поверхні довільного горизонтально-шарового розрізу, що складається з N горизонтів з потужностями $h_1, h_2, \dots, h_{N-1}, h_N = \infty$ і питомими опорами $\rho_1, \rho_2, \dots, \rho_{N-1}, \rho_N$, із наступним визначенням позірною опору $\rho_{II}(r)$ як відношення розрахованого поля до його нормального значення. При цьому за норму приймається напруженість поля точкового джерела в однорідному півпросторі з питомим опором $\rho_0 = 1$ Ом·м, що фактично відповідає густині струму. Цей розв'язок має наступний вигляд:

$$\rho_{II}(r) = \rho_1 r^2 \int_0^{\infty} m R_1(m) J_1(mr) dm,$$

де r – рознос установки ($r = AB/2$); $J_1(mr)$ – функція Бесселя першого роду першого порядку; $R_1(m)$ – рекурентна інформативна функція:

$$R_1(m) = \operatorname{cth} \left\{ mh_1 + \operatorname{archth} \left[\frac{\rho_2}{\rho_1} \operatorname{cth} \left(mh_2 + \dots + \operatorname{archth} \frac{\rho_N}{\rho_{N-1}} \right) \right] \right\}.$$

Рекурентне підінтегральне ядро $R_1(m)$ містить повну інформацію про структуру геоелектричного розрізу, тому ця функція ще інколи називається *кern-функцією*. Для двошарового розрізу з параметрами h_1, ρ_1, ρ_2 розв'язок прямої задачі подається в елементарному вигляді:

$$\rho_{II}(r) = \rho_1 \left\{ 1 + 2 \sum_{j=1}^{\infty} \frac{k^j r^3}{\left[r^2 + (2jh_1)^2 \right]^{3/2}} \right\},$$

де $k = (\rho_2 - \rho_1) / (\rho_2 + \rho_1)$ – коефіцієнт відбиття.

Розраховані теоретичні криві ВЕЗ будують на логарифмічних бланках у відносному зображенні: $\rho_{II}/\rho_I = f(r/h_1)$, де r – відстань точки виміру до точкового джерела (для установки ВЕЗ $r = AB/2$). Такі побудови теоретичних кривих ВЕЗ називаються *палетками*. Приклад дво- та тришарових палеток наведений на рисунках 4,5; 4,6.

Криві ВЕЗ мають асимптоти на малих ($r \rightarrow 0$) і великих ($r \rightarrow \infty$) розносах, які виражаються наступним чином:

$$\rho_{II}(r) \Big|_{r \rightarrow 0} = \rho_I; \quad \rho_{II}(r) \Big|_{r \rightarrow \infty} = \rho_N; \quad \rho_{II}(r) \Big|_{\substack{r \rightarrow \infty \\ \rho_N = \infty}} = r/S,$$

де r – рознос установки ($r = AB/2$), ρ_I і ρ_N – питомі опори першого і останнього (основи розрізу) горизонтів, $S = \sum_{i=1}^{N-1} h_i/\rho_i$ – сумарна поздовжня провідність провідної частини розрізу.

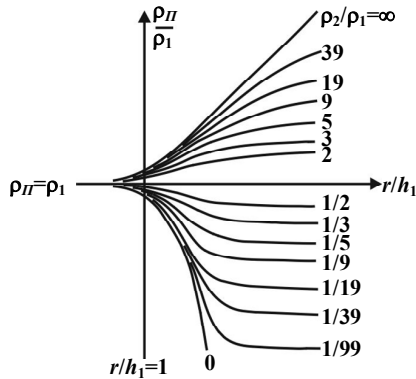


Рис. 4.5. Палетка двошарових кривих ВЕЗ:
 $\rho_2/\rho_1 = 1/9$ – шифр кривих

Асимптота кривої ВЕЗ на великих розносах для випадку, коли основою розрізу є ізолятор ($\rho_N \rightarrow \infty$), залежить від сумарної поздовжньої провідності S розрізу. У логарифмічному зображенні вона має вигляд прямої висхідної лінії під кутом 45° (на рис. 4.5 верхня крива виходить якраз на цю асимптоту). При виконанні електричних зондувань над такими розрізами ознакою закінчення є вихід трьох значень ρ_{II} на асимптоту (лінію) S .

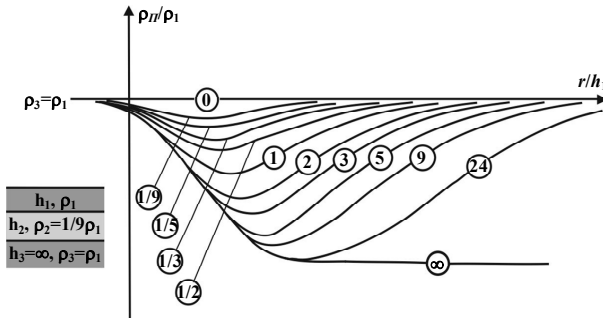


Рис. 4.6. Палетка тришарових кривих ВЕЗ ($\rho_2/\rho_1 = 1/9$, $\rho_3 = \rho_1$):
цифри в кружках – $v_2 = h_2/h_1$ (шифр кривих)

По асимптоті S досить просто визначити надзвичайно важливу узагальнену характеристику розрізу, якою є його сумарна поздовжня провідність. Для цього проводиться лінія S (пряма під кутом 45°), визначаються координати $AB/2$ і ρ_{II} довільної точки на цій лінії й обчислюється їх відношення, тобто $S = (AB/2)/\rho_{II}$. При цьому зручніше брати на лінії S таку точку, координата якої кратна 10. Зокрема, при $\rho_{II} = 1$ Ом·м значення абсциси відповідає сумарній поздовжній провідності розрізу: $S=AB/2$.

Криві ВЕЗ, як і геоелектричні розрізи, відрізняються за типами. Принцип *типізації кривих ВЕЗ* такий же, як і для геоелектричних розрізів (див. п. 1.6). Тришарові криві ВЕЗ мають типи H , A , K і Q (рис. 4.7). Тип багат шарових кривих ВЕЗ визначається аналогічно до типів багат шарових розрізів. На рис. 4.3 зображена чотиришарова крива типу KH .

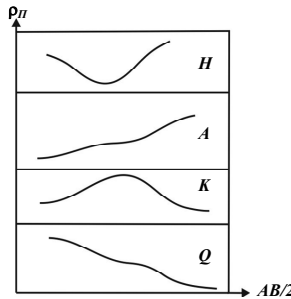


Рис. 4.7. Типи тришарових кривих ВЕЗ

Аналіз розрахунків кривих ВЕЗ для різних геоелектричних розрізів свідчить, що їм властива *еквівалентність*, яка полягає в наявності практичної відповідності однієї кривої ВЕЗ певній множині геоелектричних розрізів із різними параметрами проміжних горизонтів.

Для тришарових розрізів розрізняють еквівалентність за поздовжньою провідністю ($S_2 = h_2/\rho_2$) та поперечним опором ($T_2 = h_2\rho_2$) проміжного горизонту. Еквівалентність по S_2 характерна для розрізів типу H і A , а по T_2 – для розрізів типу K і Q . Два розрізи типу H чи A вважаються еквівалентними, якщо в них однакові поздовжні провідності проміжних горизонтів, тобто $h_2/\rho_2 = h'_2/\rho'_2$ (за умови, що h_1 , ρ_1 і ρ_3 однакові для обох розрізів). Тобто, два розрізи типу K чи Q еквівалентні, якщо $h'_2\rho'_2 = h_2\rho_2$.

Оскільки принцип еквівалентності є практичною категорією (відмінність між кривими ВЕЗ для еквівалентних розрізів завжди має місце, але вона незначна, наприклад, до 5%), то існують межі дії цього принципу. Зокрема, за значної потужності проміжного горизонту принцип еквівалентності практично не діє, а при малопотужному проміжному горизонті він має досить широкі межі дії. Наявність еквівалентності приводить до неоднозначності результатів інтерпретації. А тому для регуляризації процесу кількісної інтерпретації кривих ВЕЗ бажано заздалегідь знати один із параметрів проміжних горизонтів – потужність чи питомий опір. Частіше за все закріплюють питомий опір.

Розрізняють якісну та кількісну інтерпретацію даних електричних зондувань.

Якісна інтерпретація кривих ВЕЗ. Якісна інтерпретація кривих електричного зондування спрямована на визначення загальних закономірностей геологічної будови досліджуваного району та оцінки ймовірних зон знаходження тих чи інших геологічних структур. Методи якісної інтерпретації ґрунтуються на зв'язку між особливостями будови геоелектричного розрізу й параметрами кривих електричних зондувань. Зазвичай на етапі якісної інтерпретації виконують побудову різних карт і графіків, а саме: а) карти типів кривих зондувань; б) карти ізоом; в) вертикальні розрізи ізоом; г) карти ізоліній сумарної поздовжньої провідності та ін.

Карти типів кривих зондувань схематичні й показують розподіл областей розповсюдження однотипних та близьких за типом кривих ВЕЗ. Ці карти несуть інформацію про особливості загальної геологічної будови району досліджень.

Карти ізоом позірних опорів – карти ізоліній позірного опору, побудовані в горизонтальній площині за значеннями ρ_{II} для фіксованого розносу установки. Така карта (чи набір карт для різних розносів) якісно відображає зміну електричних властивостей розрізу в горизонтальному напрямку на приблизно однаковому глибинному рівні.

Вертикальний розріз ізоом – це карта ізоом позірного опору, яка будується у вертикальній площині, що проходить уздовж профілю дослідження. Для її побудови на вертикальних осях кожної точки ВЕЗ, розташованої на профілі, виписують значення позірних опорів, що відповідають фіксованим глибинам, кількісно рівним $AB/2$ (як правило, дані цих глибин відкладають у логарифмічному масштабі). Потім проводять ізолінії рівних значень ρ_{II} . Отриманий вертикальний розріз якісно відображає особливості реального геоелектричного розрізу. Для більшої виразності він може бути розфарбованим різною кольоровою тональністю відповідно до значень ρ_{II} . По такому розрізу встановлюються зони розповсюдження високоомних і провідних горизонтів, напрямки падіння верств розрізу, за наявності вузьких високоградієнтних областей визначається присутність розломів і т. ін. Приклад вертикального розрізу позірного опору приведений на рис 4.4.

Вертикальний розріз нормованих похідних ρ_{II} . Цей спосіб побудови вертикальних розрізів ґрунтується на припущенні, що зміна позірного опору при збільшенні розносів пов'язана тільки зі зміною дійсного опору з глибиною і для двох сусідніх розносів ця зміна ρ_{II} може бути апроксимована лінійним законом. Аналогічно зміна позірного опору на двох сусідніх точках зондувань на фіксованому розносі r_i зумовлена зміною дійсного опору в горизонтальному напрямку й також має лінійний характер.

Спираючись на висловлені припущення, для даного розносу r_i (i – номер розносу) на кожній точці ВЕЗ профілю розраховують приріст позірного опору $\Delta_j(r_i)$:

$$\Delta_j(r_i) = \rho_{IIj}(r_i) - \rho_{IIj}(r_{i-1}),$$

де j – порядковий номер зондування (ВЕЗ) на профілі.

Потім для даного розносу r_i розраховують середнє (фонове або "нормальне") значення приросту $\rho_{л}$, властиве для всього профілю:

$$\Delta_{cep}(r_i) = \frac{1}{n} \sum_{j=1}^n \Delta_j(r_i),$$

де n – загальна кількість зондувань на профілі.

У подальшому для кожної точки j профілю розраховують відносний приріст $\delta_j(r_i)$ позірнього опору:

$$\delta_j(r_i) = \Delta_j(r_i) - \Delta_{cep}(r_i).$$

Цей параметр отримав назву вертикальної нормованої похідної позірнього опору.

Аналогічним способом на розносі r_i можна розрахувати нормований горизонтальний приріст (нормовану горизонтальну похідну) позірнього опору $\delta_i(x_j)$:

$$\delta_i(x_j) = \Delta_i(x_j) - \Delta_{cep}(r_i),$$

де $\Delta_i(x_j) = \rho_{пi}(x_j) - \rho_{пi}(x_{j-1})$, $\Delta_{cep}(r_i) = \frac{1}{n-1} \sum_{j=1}^{n-1} \Delta_i(x_j)$, x_j –

координати точки зондування з номером j .

За значеннями $\delta_j(r_i)$ і $\delta_i(x_j)$ будують вертикальні розрізи способом, який описаний вище для побудови вертикальних розрізів $\rho_{л}$.

Інколи, замість $\delta_j(r_i)$ і $\delta_i(x_j)$, розраховують так звані "повні" вертикальні й горизонтальні похідні, розуміючи під цими термінами різниці:

$$\delta'_j(r_i) = \delta_j(r_i) - \delta(r_i)_{\min} \quad \text{і} \quad \delta'_i(x_j) = \delta_i(x_j) - \delta_i(x_j)_{\min},$$

в яких $\delta(r_i)_{\min}$ і $\delta_i(x_j)_{\min}$ – мінімальні значення відповідних величин для даного розносу чи даного зондування.

Якісну інтерпретацію з побудовою розрізів нормованих похідних позірнього опору часто використовують при пошуках вуглеводнів для фіксації в розрізах зон підвищеного опору, як можливих пасток для вуглеводнів. На рис. 4.8 зображений розріз "повних" нормованих похідних для одного із нафтогазоносних районів, зіставлений із геологічним розрізом за даними буріння.

Розглянутий спосіб якісної інтерпретації є достатньо трудомістким, а тому його доцільно виконувати із застосуванням комп'ютерної техніки.

Карти ізоліній сумарної поздовжньої провідності S .
Ці карти будуються при площових дослідженнях методом ВЕЗ за результатами визначення сумарної поздовжньої провідності за асимптотичними гілками кривих зондувань (методика визначення S розглянута вище). Карти S якісно відображають зміну сумарної потужності H надпорної провідної частини геоелектричного розрізу, тобто глибини до поверхні непровідної ($\rho_N = \infty$) основи. При постійному (чи маломінливому) значенні середнього поздовжнього опору ρ_l на площі досліджень карти S можуть бути трансформовані в карти глибин за формулою $H = S\rho_l$. Значення ρ_l знаходять за результатами параметричних ВЕЗ на свердловинах: $\rho_l = H_0/S_0$, де H_0 – потужність надпорної частини розрізу, яка відома за даними буріння; S_0 – сумарна поздовжня провідність розрізу, визначена по параметричній кривій ВЕЗ.

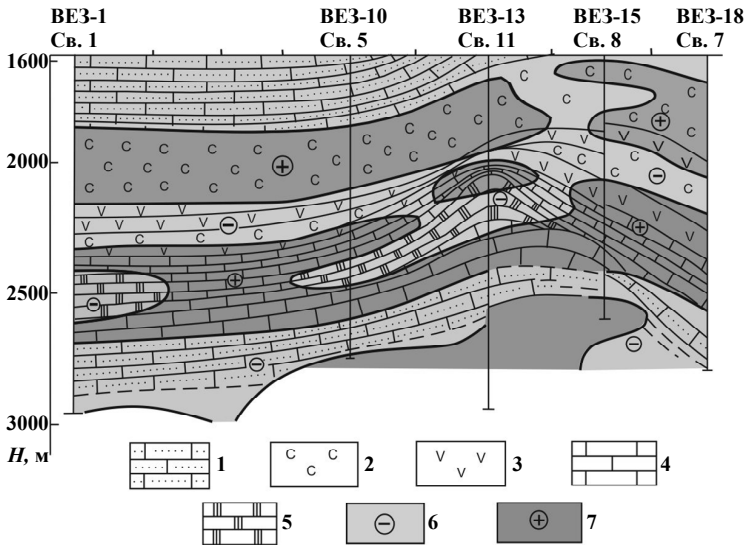


Рис. 4.8. Розріз "повних" нормованих похідних ρ_l , зіставлений із даними буріння (за Н. Г. Зариповою, М. О. Киричек та ін.):
1 – пісковики; 2 – сіль; 3 – ангідрити; 4 – вапняки; 5 – рифогенні вапняки;
6 і 7 – області відповідно низьких та високих опорів

На етапі якісної інтерпретації можуть виконуватися й інші побудови, наприклад, *карти ізоліній ординат та абсцис екстремальних точок* кривих ВЕЗ ($\rho_{\text{Лmin}}$, $\rho_{\text{Лmax}}$, $(AB/2)_{\text{min}}$, $(AB/2)_{\text{max}}$), які дають якісне уявлення про зміну потужності проміжного горизонту та глибин до його поверхні.

Кількісна інтерпретація кривих ВЕЗ. Задачею кількісної інтерпретації кривих ВЕЗ є визначення потужностей і питомих опорів геоелектричних горизонтів. Варті уваги два основних способи кількісної інтерпретації – палетковий та автоматизованого підбору (або машинний чи комп'ютерний).

Палетковий спосіб інтерпретації кривих ВЕЗ. Палетка – це логарифмічний бланк, на якому побудована низка розрахованих теоретичних кривих ВЕЗ у відносному функціональному зображенні: $\rho_{\text{П}}/\rho_1 = f(r/h_1)$, де $r = AB/2$ (приклади палеток наведені на рисунках 4.5; 4.6). Для палеткової інтерпретації використовується двошарова та, як правило, набір (альбом) тришарових палеток. Кожна палеткова крива електричного зондування має свій шифр. Для двошарової палетки – це значення модуля $\mu_2 = \rho_2/\rho_1$ (відносного опору другого горизонту), а для тришарової – значення трьох модулів: $\mu_2 = \rho_2/\rho_1$ і $\mu_3 = \rho_3/\rho_1$ та $v_2 = h_2/h_1$ (відносної потужності проміжного горизонту). Модулі μ_2 й μ_3 тришарової палетки можна вважати шифром самої палетки, оскільки їх значення однакові для всіх кривих, зображених на ній, а модуль v_2 – шифром кривих палетки.

Процес інтерпретації полягає в графічному співставленні польової кривої ВЕЗ із палетковими й підборі на цій основі такої теоретичної кривої, яка найкраще збігається з експериментальною. Параметри геоелектричного розрізу, що відповідають підбраній теоретичній кривій, є результатом формальної кількісної інтерпретації.

Практична реалізація палеткової інтерпретації *дво- та тришарових польових кривих ВЕЗ* полягає в наступному: попередньо експериментальна крива будується на прозорому логарифмічному бланку модуля 6,25 см. Потім цей бланк розташовують поверх відповідної палетки й шляхом його переміщення по палетці (зберігаючи паралельність осей бланка та палетки) добивають найкращого графічного суміщення експериментальної

кривої з однією із теоретичних кривих палетки. Після виконання цієї дії на прозорому бланку відмічають початок координат палетки, яким є точка перетину її одиничних осей $r/h_1 = 1$ і $\rho_{II}/\rho_1 = 1$ і фіксують значення модулів палеткової кривої, суміщеної з експериментальною (для двошарової кривої – це значення μ_2 , а для тришарової – значення трьох модулів: μ_2 , μ_3 й ν_2). У подальшому параметри першого горизонту h_1 і ρ_1 визначають як значення, відповідно, абсциси й ординати, перенесеної на прозорий бланк точки початку координат палетки, а параметри наступних горизонтів розрізу розраховують: $\rho_2 = \mu_2\rho_1$, $h_2 = \nu_2h_1$, $\rho_3 = \mu_3\rho_1$. Для двошарової кривої обмежуються розрахунком лише ρ_2 .

При неможливості суміщення експериментальної й теоретичної кривих добиваються найкращого розташування польової кривої між двома сусідніми палетковими. У цьому випадку значення модуля ν_2 підбраної теоретичної кривої визначають шляхом інтерполяції в межах значень модулів палеткових кривих, між якими розташувалася експериментальна.

Досить часто при інтерпретації тришарових кривих доводиться виконувати графічне суміщення не повних кривих, а лише їх початкових і середніх частин. Ця обставина пов'язана з обмеженістю діапазону значень модуля $\mu_3 = \rho_3/\rho_1$ в альбомах тришарових палеток.

При інтерпретації тришарових кривих БЕЗ доводиться із альбому палеток вибрати одну, яку використовують для графічних співставлень з експериментальною кривою. Виконання такого вибору вимагає знання модулів $\mu_2 = \rho_2/\rho_1$ і $\mu_3 = \rho_3/\rho_1$ необхідної палетки. Значення цих модулів оцінюють шляхом попередньої інтерпретації двошаровою палеткою початкової малорозносної гілки експериментальної кривої БЕЗ та візуальної оцінки ρ_3 за асимптотичною гілкою даної кривої на великих розносах $AB/2$. У результаті з набору тришарових палеток вибирають ту, модуль якої є найбільш близькими до попередньо визначених. Якщо на вибраній палетці не вдається сумістити експериментальну криву з жодною з теоретичних або ж розташувати між двома сусідніми теоретичними, то вибирають сусідні палетки й повторюють процес графічного підбору теоретичної кривої.

Отримані результати інтерпретації тришарових кривих ВЕЗ носять формальний характер, оскільки можуть знаходитися в межах дії принципу еквівалентності. А тому при апріорі відомому (закріпленому) значенні питомого опору проміжного горизонту ρ'_2 необхідно уточнити отриману в результаті інтерпретації потужність h_2 згідно з принципом еквівалентності: $h'_2 = h_2 \cdot \rho'_2 / \rho_2$ – для кривих H і A ; $h'_2 = h_2 \cdot \rho_2 / \rho'_2$ – для кривих K і Q .

Палеткова інтерпретація *багатощарових кривих* зондувань ґрунтується на апроксимації цих кривих рядом тришарових (чи їх елементів). Спочатку на експериментальній кривій виділяють її лівий тришаровий інтервал, що відповідає відносно невеликим розносам, і інтерпретують його за методикою інтерпретації тришарових кривих, визначаючи h_1 , ρ_1 , h_2 й ρ_2 . У подальшому перші два горизонти замінюють одним еквівалентним шаром, параметри якого h_e й ρ_e визначаються відповідно до типу початкового розрізу:

$$\text{для типу } H: \quad h_{e,H} = h_1 + h_2, \quad \rho_{e,H} = (h_1 + h_2) / (h_1 / \rho_1 + h_2 / \rho_2);$$

$$\text{для типу } Q: \quad h_{e,Q} = \frac{1}{\eta} h_{e,H}, \quad \rho_{e,Q} = \frac{1}{\eta} \rho_{e,H};$$

$$\text{для типу } A: \quad h_{e,A} = \sqrt{(h_1 \rho_1 + h_2 \rho_2) (h_1 / \rho_1 + h_2 / \rho_2)},$$

$$\rho_{e,A} = \sqrt{(h_1 \rho_1 + h_2 \rho_2) / (h_1 / \rho_1 + h_2 / \rho_2)};$$

$$\text{для типу } K: \quad h_{e,K} = \varepsilon h_{e,A}, \quad \rho_{e,K} = \rho_{e,A}.$$

Наведені формули дозволяють розраховувати координати так званих *характерних еквівалентних точок*. Ці точки потім наносяться на прозорий логарифмічний бланк з експериментальною кривою. Коефіцієнти η й ε у формулах є емпірично-функціональними, перший залежить від модулів $\mu_2 = \rho_2 / \rho_1$ і $\nu_2 = h_2 / h_1$ розрізу, а другий – від коефіцієнта макроанізотропії двох горизонтів $\lambda = \sqrt{(h_1 \rho_1 + h_2 \rho_2) (h_1 / \rho_1 + h_2 / \rho_2) / (h_1 + h_2)}$.

Для визначення коефіцієнтів η й ε , які входять у формули для розрахунку координат характерних еквівалентних точок, існують спеціальні номограми, побудовані на основі емпіричних досліджень. У більшості альбомів тришарових палеток є допо-

міжні палетки, за допомогою яких можна спочатку встановлювати положення характерних еквівалентних точок на прозорому логарифмічному бланку, а потім визначати їх координати h_e і ρ_e . У деяких альбомах характерні еквівалентні точки кожної кривої нанесені безпосередньо на бланк палетки, що дозволяє в процесі інтерпретації досить просто виконувати еквівалентні заміни шляхом перенесення цих точок на прозорий логарифмічний бланк з експериментальною кривою.

Отже, виконавши еквівалентну заміну перших двох горизонтів, наносять характерну еквівалентну точку (h_{e1} , ρ_{e1}) на прозорий бланк і, виділивши на експериментальній кривій ВЕЗ тришаровий фрагмент, що відповідає розрізу з параметрами h_{e1} , ρ_{e1} , h_3 , ρ_3 , ρ_4 , інтерпретують його, визначаючи h_3 і ρ_3 . У подальшому, знову виконавши заміну горизонтів h_{e1} , ρ_{e1} , h_3 , ρ_3 на еквівалентний горизонт h_{e2} , ρ_{e2} , інтерпретують наступний тришаровий фрагмент експериментальної кривої зондування, визначаючи h_4 , ρ_4 і т. д. Таким чином вдається послідовно визначити всі параметри h_1 , ρ_1 , h_2 , ρ_2, \dots, h_{N-1} , ρ_{N-1} , ρ_N горизонтально-шарового розрізу, зображеного на рис. 1.1, б. На рис. 4.9 наведена схема такої інтерпретації на прикладі п'ятишарової кривої.

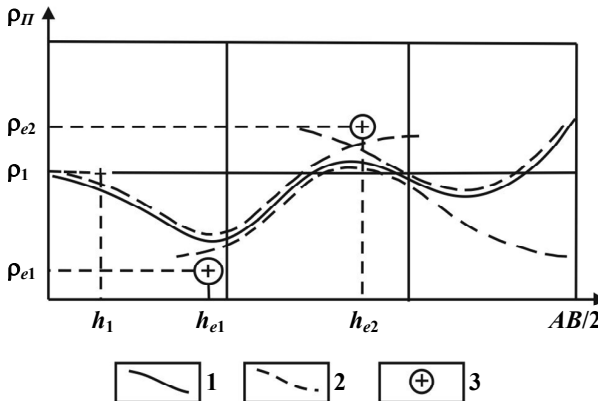


Рис. 4.9. Схема інтерпретації багатошарової кривої ВЕЗ типу *НКН* тришаровими палетками:

- 1 – експериментальна крива; 2 – палеткова крива;
- 3 – характерна еквівалентна точка

Інтерпретація даних ВЕЗ методом автоматизованого підбору.

На сучасному етапі, у зв'язку з широким упровадженням комп'ютерної техніки (перш за все ПЕОМ) у практику геофізичних досліджень, методи інтерпретації електророзвідувальних даних із застосуванням ЕОМ практично повсюдно витісняють палеткову (ручну) інтерпретацію. В основу автоматизованих методів інтерпретації покладена та ж ідея методу підбору, яка використовується і в палеткових способах інтерпретації, тобто електронно-обчислювальна машина (комп'ютер) за спеціально розробленими програмами виконує в автоматизованому режимі підбір такої теоретичної кривої електричного зондування, яка найкраще збіглася б з експериментальною. Найбільш поширеними спеціалізованими програмами інтерпретації ВЕЗ є програми типу ІРІ, ЗОНД.

Позначимо через $\rho_{II}^T(\rho_1, h_1, \rho_2, h_2, \dots, \rho_{N-1}, h_{N-1}, \rho_N)$ теоретичну криву електричного зондування, що відповідає певному N -шаровому розрізу з потужностями горизонтів h_1, h_2, \dots, h_{N-1} і питомими електричними опорами $\rho_1, \rho_2, \dots, \rho_N$ (співвідношення для кривої позірного опору $\rho_{II}(r)$ наведено вище). Через ρ_{II} позначимо експериментальну криву електричного зондування, яка підлягає інтерпретації. Нехай ця крива цифрована на M розносках. Припустимо, що $\rho_{II,j}$ позначає величину позірного опору польової кривої зондування на j -му розносі $AB/2$, а $\rho_{II,j}^T$ – відповідне значення позірного опору теоретичної кривої на цьому ж розносі.

Тоді задача підбору шуканих параметрів розрізу (потужностей і опорів горизонтів) може бути зведена до мінімізації за параметрами $\rho_1, h_1, \rho_2, h_2, \dots, \rho_{N-1}, h_{N-1}, \rho_N$ наступного функціоналу відхилення:

$$\delta(\mathbf{p}) = \sum_{j=1}^M \left[\left(\rho_{II,j} - \rho_{II,j}^T \right) / \rho_{II,j}^T \right]^2 = \min ,$$

де $\mathbf{p} = \rho_1, h_1, \rho_2, h_2, \dots, \rho_{N-1}, h_{N-1}, \rho_N$ – вектор параметрів розрізу; M – загальна кількість розносів, на яких цифрована крива зондування (необхідно, щоб виконувалася умова $M \geq 2N-1$). Інколи мінімізують логарифмічний функціонал відхилення:

$$\delta_{\log}(\mathbf{p}) = \sum_{j=1}^M \left(\log \rho_{II,j} - \log \rho_{II,j}^T \right)^2 = \min .$$

Задача підбору вирішується на основі ітераційної процедури, що полягає в послідовній корекції вектора параметрів розрізу \mathbf{p} й отриманні певної послідовності значень параметрів цього вектора (\mathbf{p}_i , $i = 1, 2, 3, \dots$). У цій послідовності кожен наступний значення приводять до зменшення (мінімізації) функціоналу відхилення. Корекція параметрів вектора \mathbf{p} виконується за допомогою методу найшвидшого спуску чи методу Ньютона. При цьому на кожному наступному кроці ітераційного процесу теоретична крива зондування буде наближатися до експериментальної. Ітераційна процедура завершується, коли функціонал δ стає сумірним з величиною середньоквадратичної похибки визначення позірного опору.

У сучасних програмних розробках, які реалізують автоматизовану інтерпретацію, передбачений як режим повністю автоматизованої інтерпретації (формальної інтерпретації), так й інтерактивний режим, у процесі якого інтерпретатор має змогу активного втручання в інтерпретаційний процес, задаючи кількість горизонтів і змінюючи їх параметри. Безперечно, що в процесі автоматизованої інтерпретації, як і палетковій теж, необхідно використовувати апріорну опорну інформацію, яка зменшує еквівалентність і підвищує однозначність розв'язку оберненої задачі.

Нині створені й успішно функціонують програми автоматизованого підбору геоелектричних розрізів, що ґрунтуються на мінімізації так званих параметричних функціоналів Тихонова:

$$m_{\alpha}(\mathbf{p}) = \delta(\mathbf{p}) + \alpha\Omega(\mathbf{p}),$$

де $\Omega(\mathbf{p})$ – стабілізуючий функціонал, роль якого полягає в запобіганні нестійкості параметрів розрізу; α – параметр регуляризації, що контролює вплив стабілізатора.

Основним результатом робіт методом ВЕЗ є, як правило, *геоелектричні розрізи*, побудовані на основі кількісної інтерпретації кривих зондувань. Для побудови таких розрізів у кожній точці ВЕЗ, розташованій на профілі, уздовж глибинної осі відкладають глибини до поверхонь пластів, виділених у процесі інтерпретації, із зазначенням питомих опорів цих пластів. Потім плавно з'єднують глибинні відмітки ідентифікованих шарів й отримують вертикальний геоелектричний розріз (приклад

наведений на рис.4.10, а). При площових дослідженнях можлива побудова структурних карт поверхонь опорних пластів (рис.4.10, б).

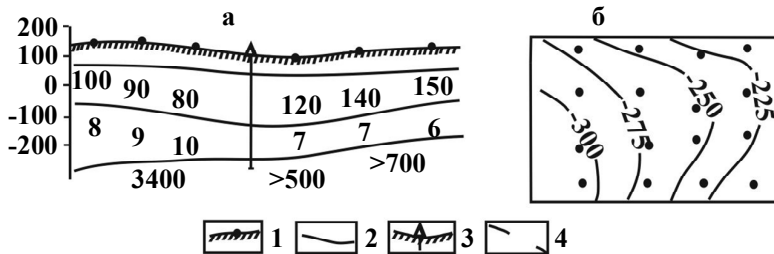


Рис. 4.10. Геоелектричний розріз (а) і структурна карта опорного шару (б), побудовані за результатами інтерпретації ВЕЗ:

1 – рельєф і точки спостережень; 2 – геоелектричні границі з питомим опором (Ом·м); 3 – свердловина; 4 – ізогіпси покрівлі опорного шару

Польові криві ВЕЗ, як й інших видів зондувань, можуть бути спотворені через вплив горизонтальних неоднорідностей і відрізнятися від теоретичних кривих, що відповідають одновимірним розрізам. Урахування цих спотворень можливе лише шляхом чисельного розв'язку прямих задач електророзвідки на постійному струмі для дво- та тривимірних геоелектричних моделей. Однак поки що такі розрахунки не ввійшли повсюдно в практику електророзвідки, хоча певні успіхи в цьому напрямку є. А тому при аналізі кривих зондувань у більшості обмежуються лише якісним урахуванням таких спотворень.

Завдання на виконання ВЕЗ

1. Змонтувати установку для вертикального електричного зондування. Під час монтажу потрібно керуватися схемою, зображеною на рис. 4.1.

2. Розрахувати коефіцієнти установки для прийнятих розносів.

3. Виконати зондування на ділянці зйомки. Провести геодезичну (напівінструментальну або окомірну) прив'язку точок ВЕЗ до орієнтирів, що є на картах.

4. Після закінчення польових робіт перевірити обчислення в польовому журналі у "другу" руку.

5. Виконати обробку результатів електрондувань і скласти наступні звітні матеріали: альбом кривих ВЕЗ; карту розташування точок ВЕЗ (карту фактичного матеріалу); вертикальні розрізи ρ_{Π} ; карту опорів для окремих розносів.

6. Дати короткий опис геоелектричного розрізу ділянки зйомки і його особливостей, спираючись на аналіз форми кривих ВЕЗ і загальні відомості про геологічну будову району.

Після повного завершення робіт бригада надає наступні звітні матеріали: 1) польовий журнал; 2) альбом кривих ВЕЗ; 3) вертикальні розрізи ρ_{Π} ; 4) карти позірних опорів; 5) короткий опис геоелектричного розрізу й геологічне тлумачення результатів електрондувань.

4.2. Дипольні електричні зондування (ДЗ)

Основу дипольних електричних зондувань, як і вертикальних зондувань (ВЕЗ), складає геометричний принцип. Для практичної реалізації дипольних зондувань застосовують два електричні диполі (заземлені лінії) – живильний AB і приймальний MN . При цьому приймальний диполь винесений за межі живильного. Глибинність дослідження регулюється розносом r дипольних установок – відстанню між центрами живильного й приймального диполів. Криві дипольних зондувань отримують шляхом багаторозносних вимірів позірного опору. Для цього на кожному розносі r пропускають струм у диполь AB , вимірюючи його силу I , під час пропускання струму вимірюють також різницю потенціалів ΔU у приймальному диполі MN . За результатами вимірів струму й різниці потенціалів розраховують позірний опір згідно з формулою, яка використовується в методі опорів: $\rho_{\Pi} = K\Delta U/I$, де K – коефіцієнт установки.

Залежно від взаємної орієнтації живильного AB і приймального MN диполів розрізняють наступні типи дипольних установок: перпендикулярні (ортогональні), паралельні, радіальні, азимутальні, екваторіальні й осьові (рис. 4.11). У практиці дипольних електричних зондувань зазвичай використовують азимутальну, екваторіальну й осьову установки.

В азимутальній установці (зондування такою установкою позначають ДАЗ) приймальний диполь MN перпендикулярний радіусу r . Параметри азимутальної установки повинні задовольняти наступним умовам: $AB < 0,6r$; $MN < 0,2r$; $70^\circ < \varphi < 110^\circ$ (AB і MN – розміри живильного та приймального диполів; φ – кут між віссю диполя AB й радіусом r , який називається зигмутальним кутом установки). Формула для розрахунку коефіцієнта K азимутальної установки (як і коефіцієнтів для дипольних установок інших типів) установлюється на основі нормального поля диполя, розглянутого вище, і має вигляд:

$$K = 2\pi r^3 a / (AB \cdot MN \cdot \sin \varphi).$$

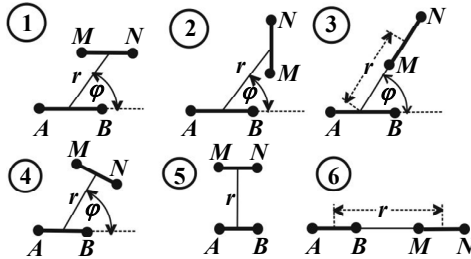


Рис. 4.11. Типи дипольних установок:

- 1 – паралельна; 2 – ортогональна (перпендикулярна);
3 – радіальна; 4 – азимутальна; 5 – екваторіальна; 6 – осьова

Частковим випадком азимутальної установки є екваторіальна (зондування такою установкою позначають ДЕЗ). У цій установці кут $\varphi = \pi/2$, диполі AB й MN паралельні, а центри їх лежать на лінії екватора живильного диполя. Коефіцієнт такої установки дорівнює:

$$K = 2\pi r^3 b / (AB \cdot MN).$$

У радіальній установці (ДРЗ) приймальний диполь направлений по напрямку радіуса r , а параметри установки повинні задовольняти наступним умовам: $AB < 0,2r$; $MN < 0,1r$; $-30^\circ < \varphi < +30^\circ$. Коефіцієнт радіальної установки обчислюється за формулою:

$$K = 2\pi r^3 c / (AB \cdot MN \cdot \cos \varphi).$$

Частковим випадком радіальної установки є дипольна осьова (ДОЗ), у якої AB і MN розташовані на осі диполя ($\varphi = 0^\circ$). Коефіцієнт такої установки дорівнює:

$$K = 2\pi r^3 d / (AB \cdot MN).$$

У наведених формулах a , b , c , d – додаткові коефіцієнти, що враховують недипольність установок. Вони близькі до 1 (для ідеальних дипольних установок вони дорівнюють 1) і визначаються за спеціальними номограмами. Зокрема для осьової установки:

$$d = \left[1 - \left(\frac{AB + MN}{2r} \right)^2 \right] \cdot \left[1 - \left(\frac{AB - MN}{2r} \right)^2 \right].$$

Під час виконання дипольних зондувань виникає питання щодо точки запису кривої ДЗ. Як правило, на практиці живильний диполь AB залишається на місці, а приймальний віддаляється від нього. Отже, і центр установки (центральна точка між диполями), до якого відносяться виміри позірнього опору, весь час зміщується. Таким чином крива ДЗ має невизначеність щодо віднесення її до точки на місцевості. Якщо розріз горизонтально-шаровий, то це питання не є принциповим і крива ДЗ відноситься до центра диполя AB .

Через невизначеність точки запису кривих ДЗ зондування виконують, частіш за все, за двосторонньою схемою. Живильний диполь залишається в центрі, а два приймальні диполі розносять в різні боки від нього. Зазвичай передбачають 20 – 25 розносів. При віддаленні від живильного диполя вимірювана різниця потенціалів зменшується до рівня, що внеможливіє її впевнену реєстрацію. У цьому випадку збільшують розміри живильного диполя, вимірюючи позірний опір на двох розносах із перекриттям (при меншому й більшому розмірах AB), як це робиться в методі ВЕЗ під час переходу на іншу приймальну лінію.

У результаті двостороннього зондування отримують дві криві ДЗ: ρ_{II}^+ і ρ_{II}^- . Розраховану середню криву $\rho_{II,сер} = (\rho_{II}^+ + \rho_{II}^-) / 2$ відносять до центра живильного диполя. Ця крива й підлягає кількісній інтерпретації, хоча криві ρ_{II}^+ та ρ_{II}^- несуть досить

цінну інформацію. Зокрема, по них можна визначити напрям падіння геоелектричних шарів.

Оскільки на практиці розміри живильної лінії сумірні з розносом дипольної установки r , то ефективна глибина зондування визначається як величиною розносу, так і довжиною живильного диполя AB . Тому криві ДЗ будуються на логарифмічних бланках як функції діючого розносу r_0 для азимутальних зондувань (ДАЗ) $r_0=r$, для екваторіальних (ДЕЗ) $r_0 = \sqrt{r^2 + (AB/2)^2}$, для ДРЗ і ДОЗ $r_0=0,5r$. Криві азимутальних й екваторіальних зондувань над горизонтально-шаровими геоелектричними розрізами співпадають із кривими ВЕЗ, а криві радіальних і осьових ДЗ мають диференціальний зв'язок із ними:

$$\rho_{\Pi}^{ДЗ} = \rho_{\Pi}^{ВЕЗ} - 0,5r \left(\frac{\partial \rho_{\Pi}^{ВЕЗ}}{\partial r} \right).$$

Асимптоти кривих дипольних зондувань такі самі, як і для кривих ВЕЗ. Однак, на відміну від кривих позірною опорю в методах ВЕЗ, ДЕЗ і ДАЗ, вихід кривих ρ_{Π} осьових і радіальних дипольних зондувань на дійсне значення ρ_1 при $r \rightarrow 0$ відбувається з незначною осциляцією.

Коли основу розрізу складає ізолятор ($\rho_N = \infty$), асимптотою кривих дипольних зондувань на асимптотично великих розносах, так само як і в методі ВЕЗ, є лінія S – пряма, нахилена під кутом 45° . У цьому випадку сумарна поздовжня провідність S геоелектричного розрізу визначається за алгоритмом, який застосовується й у методі ВЕЗ, а саме: проводиться лінія S під кутом 45° ; на лінії S береться довільна точка (бажано на ординаті, кратній 10-и) і визначаються її координати r_0 й ρ_{Π} ; розраховується сумарна поздовжня провідність за формулою: $S = r_0/\rho_{\Pi}$, де r_0 – діючий рознос дипольної установки.

Якщо оцінювати глибинність дослідження дипольними установками, то вона різна для установок різного типу. Глибинність азимутальної й екваторіальної установок така ж, як і симетричної чотирьохелектродної установки в методі ВЕЗ, у той час як глибинність радіальних й осьових ДЗ приблизно у два рази менша.

Якісна та кількісна інтерпретація кривих ДЗ та результативні геоелектричні побудови практично нічим не відрізняються від способів інтерпретації й форм зображення інформації в методі ВЕЗ.

У порівнянні з методом ВЕЗ метод ДЗ відрізняється перевагами – використанням відносно коротких ліній $MN < AB < 3\text{ км}$ та можливістю при переміщенні приймальної лінії MN працювати вздовж криволінійних маршрутів, що полегшує вирішення проблеми під'їзду до точок розмотування приймальної лінії. Однак у методі ДЗ є й недоліки – більша чутливість до наявних горизонтальних неоднорідностей і невизначеність положення точки запису односторонніх ДЗ при вивченні розрізів із похилими пластами. Остання обставина спонукає виконувати зондування за двосторонньою методикою.

4.3. Методи електричного профілювання

Електричне профілювання (ЕП) – це модифікація методу опорів, при якій уздовж заданих напрямків (профілів) переміщується установка з постійними розносами й на кожній точці визначається позірний опір. Напрямок профілів задається упоперек простягання геологічних об'єктів і структур.

Такий спосіб дослідження дає можливість вивчити геоелектричний, а отже й геологічний розрізи вздовж профілю (або по деякій площі) на приблизно однаковому глибинному рівні, що залежить від величини розносу застосовуваних установок.

При профільній зйомці точки спостережень розташовуються вздовж окремих профілів, що перетинають досліджувану площу в найбільш цікавих або характерних напрямках, зазвичай упоперек простягання порід, що її складають.

При площовій зйомці район досліджень покривається системою профілів. Відстань між профілями й пікетами на профілях залежить від масштабу зйомки та розмірів об'єктів, які необхідно виявити. Якщо досліджувані геологічні тіла або структури (наприклад, рудні тіла) мають ізометричну форму, спостереження проводяться по квадратній мережі, яка характеризується тим, що відстані між сусідніми профілями приймаються рівними відстаням між точками спостережень за профілями. При вивченні витягнутих у якому-небудь напрямку геологічних

об'єктів або структур спостереження ведуться по прямокутній мережі, яка відрізняється тим, що відстані між профілями беруться більшими, ніж відстані між точками спостережень по профілю, і профілі розташовуються впоперек простягання структур. Відстань між точками спостережень по профілю при будь-якій формі мережі вибирається з таким розрахунком, щоб на графіках ρ_{II} досить детально проявлялися всі особливості кривих – максимуми, мінімуми, точки перегину і т.д. Вибір цієї відстані здійснюється за результатами дослідних робіт на ділянках із відомою геологічною будовою. Об'єкти дослідження повинні перетинатися не менше ніж 2 – 3 профілями та фіксуватися не менше ніж 3 – 4 точками на профілях.

Електропрофілювання застосовується там, де є диференціація порід за питомим опором у горизонтальному напрямку. За зміною позірних опорів на однакових розносах можна зробити висновок про зміну геоелектричного розрізу вздовж цих профілів і в цілому по площі на приблизно однакових глибинах.

Електричне профілювання з розносами заземлень живлення, що не перевищують 1000 м, виконується за допомогою переносної електророзвідувальної апаратури типу ЭРП-1, ЭРА, АНЧ-3 або АЭ-72. При "великих" розносах необхідно застосовувати електророзвідувальні станції.

Через різноманіття задач, які необхідно вирішувати при вивченні геологічної будови верхніх горизонтів земної кори, а також при пошуках і розвідці родовищ корисних копалин існує декілька модифікацій електричного профілювання. Вони відрізняються кількістю та взаємним розташуванням електродів живильних і вимірювальних заземлень в установці, а також способом переміщення цих заземлень по профілю. Кожна модифікація призначена для вирішення певного кола геологічних задач.

4.3.1. Профілювання симетричною чотирьохелектродною установкою

Ця модифікація електропрофілювання застосовується при вивченні простих геоелектричних розрізів, в яких геологічні об'єкти, що вивчаються, знаходяться в порівняно однорідних

уміщувальних породах і перекриті витриманими за потужністю й опорами покривними відкладами.

Відмінною ознакою симетричної установки $AMNB$ є те, що вимірювальні заземлення M і N розташовуються на лінії, яка з'єднує електроди живлення, симетрично щодо центра O . Коефіцієнт установки для цього випадку розраховується за формулою:

$$K = \pi \frac{AM \cdot AN}{MN}.$$

Суть профілювання симетричною установкою розглянемо на результатах, зображених на рис. 4.12.

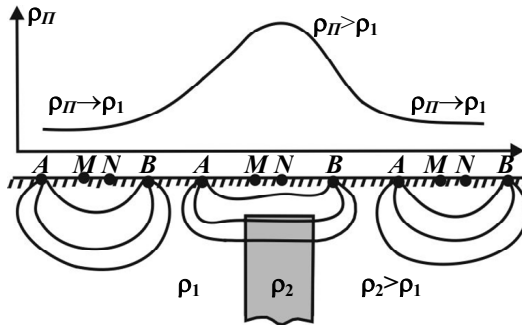


Рис. 4.12. Профілювання симетричною установкою над вертикальним пластом підвищеного питомого опору

Коли установка $AMNB$ розташована далеко від вертикального пласта, вплив його на просторовий розподіл електричного поля незначний, а тому вимірюваний позірний опір буде прямувати до питомого опору вміщувального середовища ρ_1 . Коли установка знаходиться безпосередньо над пластом підвищеного питомого опору, цей пласт відтискує струм до деної поверхні, цим самим збільшуючи його густину, а отже й напруженість поля в точці виміру (у центрі установки). Це зумовить зростання вимірюваного позірного опору. Таким чином, над пластом підвищеного опору будемо мати аномалію підвищених значень позірного опору (максимум).

Навпаки над добре провідним пластом завдяки спрямуванню струму в нього на поверхні землі відбувається зниження густини струму i , як наслідок, позірною опору. У цьому випадку пласт із підвищеною провідністю на графіку $\rho_{л}$ буде фіксуватися мінімумом.

Областю застосування симетричної установки є вирішення порівняно простих у геологічному й електричному відношеннях структурних задач. До них відносяться:

а) картування перекритих складчастих структур, складених неоднорідними в електричному відношенні гірськими породами; б) простежування контактів між різними за опорами гірськими породами за умови відносної однорідності покривних відкладів, що залягають вище; в) картування виходів під покривну товщу крутопадаючих тіл високого опору – рейок, кварцових жил і т. ін.

Монтажна схема установки (рис. 4.13). Установка для профілювання має дві лінії – живильну та вимірювальну (приймальну). Лінія живлення складається з джерела живлення, заземлень A і B , а також з'єднувальних проводів. Для вмикання й вимикання струму в лінії живлення є вмикач. У вимірювальну лінію входять заземлення M і N , вимірювальний прилад і з'єднувальні проводи.

Як джерело струму найкраще використовувати генератор апаратури ЭРА, ЭРП-1 або АНЧ-3. При застосуванні інших приладів вимірювання (наприклад, АЭ-72) джерелами живлення будуть батареї типу 100-АМЦГУ або інші. Для великих струмів застосовують машинні генератори постійного струму.

Заземлення лінії живлення зазвичай виготовляються зі стрижневих електродів, розмір і кількість яких визначаються розмірами установки, значенням позірною опору, оптимальною, щодо зручності й точності виміру, величиною різниці потенціалів між електродами M і N і, нарешті, питомим опором покривних відкладів, в які безпосередньо забиваються електроди. У складному заземленні відстань між окремими електродами раціонально приймати рівною 3 – 4-кратній довжині електрода.

В умовах навчальної практики доцільно проводити профілювання з установками малих розмірів, по-перше, тому, що це дає можливість збільшити число вимірів і переходів із точки на точку і, по-друге, дозволяє в обмежений термін провести площову зйомку з наступною побудовою карти ізоом.

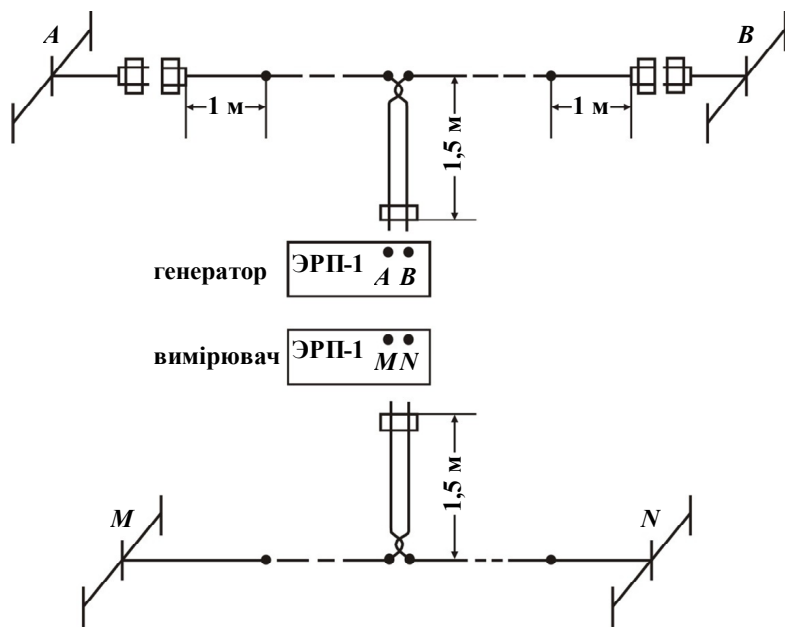


Рис. 4.13. Монтажна схема установки *AMNB*

Виготовлення ліній живлення й приймання аналогічне наведеному в п. 4.1.1. Лінія живлення виготовлена з двох відрізків проводу, зв'язаних у центрі й приєднаних окремо внутрішніми кінцями до штирів польової вилки. За допомогою цієї вилки лінія живлення підключається до генератора вимірювача ЭРП-1. До зовнішніх кінців проводів приєднуються польові вилки з гніздами. Заземлення *A* і *B* приєднуються до лінії за допомогою польових вилок.

Вимірювальна лінія виготовляється також із двох відрізків проводу. Обидва відрізки зв'язуються в центрі й приєднуються внутрішніми кінцями до штирів польової вилки, за допомогою якої лінія підключається до вимірювача типу ЭРП-1. До зовнішніх кінців лінії приєднуються вимірювальні заземлення *M* і *N*, виготовлені з латунних чи мідних стрижнів. Для виготовлення польових установок використовуються проводи типу ГПСМПО, ПСРП.

Методика польових робіт. Виконання польових робіт при симетричному профілюванні істотно залежить від розмірів установки, необхідної для вирішення поставленої геологічної задачі.

При профілюванні з установками малого розміру (відстань між заземленнями живлення не більше 1 км) можна перетягати провід із точки на точку без його попереднього змотування на котушки. При роботі з установками, розмір яких перевищує 1 км, мотування необхідне через громіздкість установки й небезпеки розриву проводів. Таким чином, від розміру установки залежать послідовність польових операцій, кількість необхідної робочої сили, а також продуктивність праці.

Польові виміри виконуються в наступному порядку: після того, як центр установки суміщений із пікетом профілю, забиті та приєднані заземлення, генератор і вимірювач включені в живильну й вимірювальну лінії, оператор робить вимір струму та напруги, обчислювач заносить ці дані в польовий журнал, підраховує значення ρ_{Π} і наносить його на графік. Впевнившись у відсутності різкої зміни форми графіка позірною опору, обчислювач повідомляє оператору про можливість подати команду на перехід до наступної точки. Цю команду подає оператор, попередньо від'єднавши генератор і вимірювач і звільнивши в такий спосіб вимірювальну та живильну лінії для їхнього перенесення.

За командою до переходу працівники на заземленнях A , M , N і B витягують із землі електроди, працівники на передніх по ходу профілювання живильному й приймальному заземленнях, а також працівник, що знаходиться в центрі установки, перетягують провід на відстань, рівну кроку профілювання, тобто до того часу, поки центр установки не опиниться на наступному пікеті профілю. Одночасно оператор переносить на нову точку спостережень вимірювач, а працівник – генератор. Закінчивши перехід на нову точку, працівники проти міток на проводах забивають живильні та приймальні заземлення й приєднують їх до відповідних ліній. За цей час оператор та працівник в центрі установки підключають до живильної та приймальної ліній відповідно генератор і вимірювач, після чого виконуються виміри на новій точці.

У графі "Примітки" обчислювач замальовує абрис місцевості вздовж профілю, визначає фактори, що можуть вплинути на величину позірною опору та на умови вимірів – заболоченість, відвали порід, гірські виробки, описує характер рослинного покриву, результати перевірок установки й т. ін. Журнал польових спостережень повинен бути підписаний оператором і обчислювачем, а після його перевірки – начальником геофізичного загону.

Результати електропрофілювання установкою *AMNB* зображуються у вигляді графіків ρ_L , карт рівних значень ρ_L (карт ізом) і карт графіків ρ_L .

Завдання

1. Змонтувати установку для електропрофілювання відповідно до монтажною схемою, зображеною на рис. 4.13. У процесі монтажу необхідно виконати наступні операції:

а) Підготувати провід лінії живлення. З проводу ГПСМПО або іншої марки виготовити два відрізки, довжина кожного з них на 2,5 м більша від $AB/2$. Відступивши на 1,5 м від кінця кожного відрізка, поставити початкову мітку, від неї відміряти відстань, рівну $AB/2$, поставити наступну мітку (див. рис. 4.13). На зовнішні кінці кожного проводу надягнути вилки з гніздами. Виготовлені дві половини лінії живлення зв'язати у вузол біля початкових міток. На внутрішні кінці проводів (біля початкових міток) надягнути вилку зі штирями. Після цього провід ретельно переглянути для виявлення місць з ушкодженою ізоляцією, "продзвонити" і змотати на катушку.

б) Підготувати провід вимірювальної лінії. Із проводу ГПСМПО виготовити два відрізки, довжина яких на 2,5 м більша від $MN/2$ (див. рис. 4.13). Відступивши на 1,5 м від кінця кожного відрізка, поставити початкову мітку, від неї відміряти відстань, рівну $MN/2$, і поставити другу мітку. Обидва відрізки приймальної лінії зв'язати біля початкових міток у вузол, а на їх кінці (біля початкових міток) надягнути вилки зі штирями. До протилежних кінців обох відрізків приєднати приймальні заземлення та місце приєднання покрити шаром ізоляції.

в) Підготувати заземлення ліній живлення й прийому. Заземлення лінії живлення виготовити із залізних (стальних) електродів, кількість і розміри яких варто визначити, виходячи з конк-

ретних умов району робіт. Залізні електроди з'єднати півтораметровими відрізками проводу у дві зв'язки (заземлення A і B). До кожної зв'язки приєднати відрізок проводу довжиною 0,5 – 0,7 м і ретельно ізолювати місце з'єднання. На кінець проводу надягнути вилку зі штирями для підключення заземлення до лінії живлення.

Заземлення M і N виготовляються з мідних електродів, що з'єднуються у зв'язки по 2 електроди в кожній. Відстань між електродами у зв'язці така ж, як і між заземленнями живлення. Для підключення зв'язок до приймальної лінії приєднується відрізок проводу довжиною близько 1 м, зачищений від ізоляції на кінці.

2. Виконати площову зйомку ділянки. Площову зйомку методом електропрофілювання провести по задалегідь розбитій мережі профілів і точок спостережень на них. Розмір установки, крок спостережень по профілю, а також відстань між профілями вибрати відповідно до конкретних умов навчальної практики.

3. Після закінчення польових робіт перевірити правильність обчислень.

4. Графічно зобразити результати спостережень. Дати геологічну інтерпретацію отриманих даних.

Після повного завершення робіт бригада представляє наступні звітні матеріали: 1) польовий журнал; 2) графіки ρ_L , карту ізоом і карту графіків ρ_L ; 3) короткий виклад результатів електропрофілювання.

4.3.2. Профілювання дворозносною симетричною установкою

Дворозносна симетрична установка відрізняється від описаної вище установки $AMNB$ наявністю ще однієї пари живильних електродів A' і B' , рознос яких менший від розносу електродів A і B і розташованих також симетрично щодо центру. Дві пари заземлень живлення дозволяють при кожному положенні установки на профілі виконувати два виміри ρ_L установкою різних розмірів й отримувати одночасно два графіки ρ_L . Оскільки зі зміною розносів заземлень живлення змінюється глибина проникнення струму в землю, два виміри позірної опоры й два графіки ρ_L характеризують геологічний розріз на різних глибинах.

Співвідношення між довжинами більшої й меншої лінії живлення вибирають, виходячи з конкретних геологічних умов. Такі дослідження підвищують інформативність електропрофілювання, дозволяючи робити висновки про характер зміни геологічного розрізу у вертикальному напрямку, а отже й про природу аномалій.

На рис. 4.14 показані результати дворозносного електропрофілювання над різним типом геологічних структур із різними співвідношеннями опорів. Характерним є те, що графік ρ_{Π} , отриманий установкою $AMNB$ (графік однорозносного СЕП), однаковий над усіма структурами. Таким чином при сумісному аналізі графіків ρ_{Π} суттєво підвищується однозначність геологічної інтерпретації результатів профілювання. Суттєве значення має випадок, коли графік ρ'_{Π} , отриманий установкою з меншою живильною лінією $A'B'$, чітко відображає зміну електричних властивостей покривних відкладів (третій фрагмент рис. 4.14). У зв'язку з цим дворозносне електропрофілювання рекомендується застосовувати в районах із неоднорідною за потужністю й опором покривною товщиною.

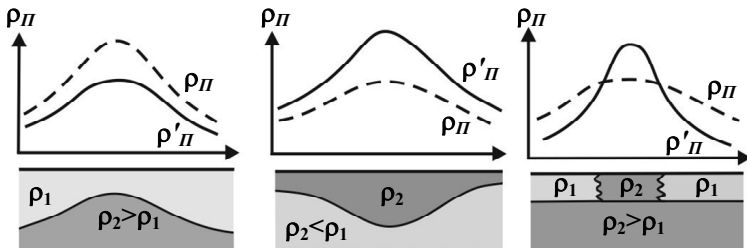


Рис. 4.14. Графіки профілювання установкою $AA'MNB'B$ над різними геологічними структурами

Дворозносне електропрофілювання виконує загалом ті ж задачі, що й перелічені вище для установки $AMNB$. Однак обмежувальні умови, які стосуються простоти структур, сталості опорів перекривальних відкладів і т. ін., у даному випадку менш істотні.

Монтажна схема установки. Монтажна схема установки $AA'MNB'B$ зображена на рис. 4.15.

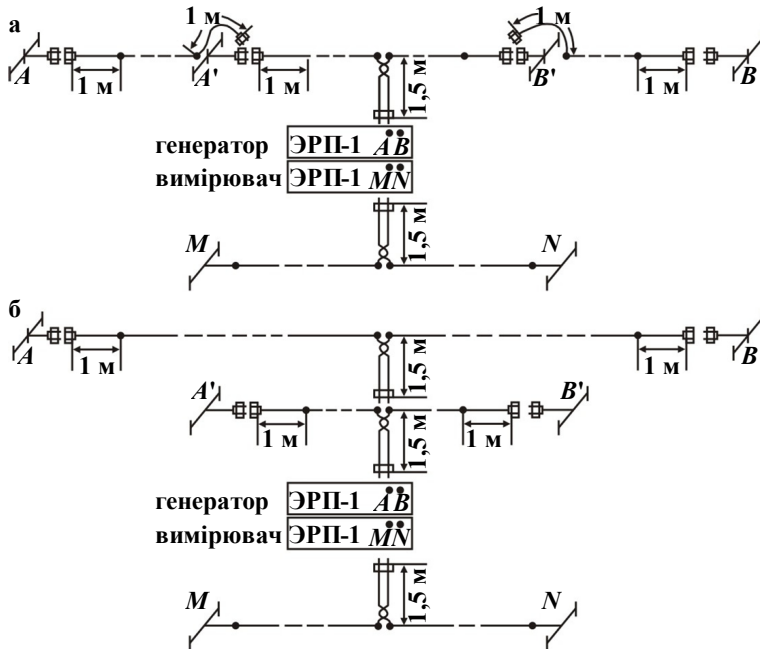


Рис. 4.15. Монтажна схема установки $AA'MNB'B$:

а – із суміщеними лініями живлення;
б – із незалежними лініями живлення

Монтажна схема дворозносної установки відрізняється від аналогічної схеми для установки $AMNB$ тим, що лінія живлення в обох крилах має розриви на відстані від центра установки, рівній $A'B'/2$. Польові вилки на кінцях проводів біля розривів дозволяють підключати до генератора ЭРП-1 електроди A і B або A' і B' (рис. 4.15, а).

На рис. 4.15, б зображений другий варіант монтажної схеми установки для профілювання з двома розносима, яка відрізняється тим, що обидві лінії живлення змонтовані окремо. Для зручності переміщення такої установки по профілю доцільно обидві лінії живлення скріпити між собою через кожні 1 – 2 м ізоляційною стрічкою.

Методика польових робіт. Польові операції на кожній точці починаються з виміру $\rho_{\text{л}}$ на більшому розносі AB . Для цього працівники біля заземлень A' і B' з'єднують вилки, що знаходяться на розриві лінії живлення, приєднуючи таким чином заземлення A і B . Приймавши від працівників сигнал про готовність більшої лінії, оператор вмикає струм, вимірює його силу I та різницю потенціалів ΔU і повідомляє виміряні значення обчислювачеві, який записує їх у журнал і розраховує позірний опір $\rho_{\text{л}}$. На кожній п'ятій чи десятій точці, а також на всіх точках із різкою зміною ходу графіка $\rho_{\text{л}}$ оператор проводить повторні виміри зі зміною опору заземлення.

Закінчивши виміри на більшій лінії, оператор подає команду про приєднання заземлень малої живильної лінії $A'B'$. За цією командою працівники біля заземлень A' і B' відключають більшу лінію й підключають свої заземлення. Приймавши від працівників сигнал про готовність меншої лінії, оператор проводить заміри I та ΔU , при необхідності виконує повторні заміри. Після закінчення повного циклу замірів на точці (пікеті) профілю оператор подає команду про перехід на наступну точку й від'єднує прилади. Одержавши команду про перехід на наступну точку, працівники на заземленнях витягають електроди із землі й перетягують лінію живлення на наступну точку. При цьому працівник, який знаходиться в центрі установки, стежить за тим, щоб її центр зупинився проти відповідного пікету профілю. Після цього переміщують приймальну лінію.

Для зручності переміщення установки по профілю розміри ліній живлення зазвичай вибирають такими, щоб розноси AB , $A'B'$ і MN були кратними величинами, а крок установки по профілю збігався з довжиною приймальної лінії або був кратним їй.

На кожній десятій точці оператор виконує перевірку лінії живлення на витoki струму й величину опору приймальних заземлень (див. додаток А).

Результати польових спостережень записуються в журнал. У графі "Примітки" записуються ті ж дані, що й у відповідній графі журналу для профілювання установкою $AMNB$.

При профілюванні установкою з двома незалежними лініями живлення (рис. 4.15, б) порядок роботи відрізняється від розглянутого вище тільки тим, що перемикання з великої лінії на малу здійс-

снюють не працівники біля заземлень A' і B' , а сам оператор, який від'єднає від генератора лінію AB і приєднає меншу лінію $A'B'$.

Журнал польових спостережень методом електропрофілювання установкою $AA'MNB'B$ має вигляд:

Ділянка – "Східна". Дата – 07.05.2010. Ясно, сухо.
Профіль – III. Початок спостережень – 7 год 15 хв.
 $AB = 180$ м; $A'B' = 60$ м. Кінець спостережень – 10 год 20 хв.
 $MN = 20$ м; $K = 1256$ м. $K' = 125,6$ м. Крок = 20 м.
Оператор – Сіриця Д. І. Обчислювач – Редько Р. А.

№ точки	$AB=180$ м, $K=1256$ м			$A'B'=60$ м, $K=125,6$ м			Примітки
	I , мА	ΔU , мВ	ρ_L , Ом·м	I , мА	ΔU , мВ	ρ_L , Ом·м	
1	150	12,2	102	88,5	120	170	
2	172	18,5	135	73,2	114,2	196	
3	175	12,1	87	66	56,8	108	

Оператор _____ Обчислювач _____
 (підпис) (підпис)

Результати симетричного електропрофілювання установкою $AMNB$ зображуються у вигляді графіків ρ_L , карт рівних значень позірного опору (карт ізоом) і карт графіків ρ_L .

Способи зображення результатів профілювання дворозносною установкою практично такі ж самі, як і при однорозночному профілюванні. Відмінність полягає лише в тому, що на графіках ρ_L умовними знаками наносяться дві криві, які характеризують зміну позірного опору на обох розносах. Карти ізоом і карти графіків ρ_L будуються для кожного розносу окремо й оформлюються так само, як і при профілюванні з установкою $AMNB$.

Завдання

1. Змонтувати установку для електропрофілювання з подвійними розносами відповідно до схеми монтажу, зображеної на рис. 4.15а. У процесі монтажу необхідно виконати наступні операції:

а) Підготувати провід лінії живлення. Із проводу ГПСМПО або іншої марки виготовити два відрізки, довжина яких на 2,5 м більша від різниці між піврозносами $AB/2$ і $A'B'/2$. Відступивши

на 1 м від обох кінців відрізків, поставити мітки. На зовнішні кінці обох відрізків надягнути вилки з гніздами, а на внутрішні (біля розриву) – вилки зі штирями. Крім зазначених, виготовити ще два відрізки проводу з довжиною кожного, що на 2,5 м перевищує рознос $A'B'/2$. Відступивши на 1,5 м від кінців цих відрізків, поставити початкові мітки, відміряти від них відстані $A'B'/2$, поставити кінцеві мітки й на зовнішні кінці надягнути вилки з гніздами. Виготовлені відрізки зв'язати попарно біля міток, що знаходяться на розриві. Підготовлені в такий спосіб дві половини живильної лінії зв'язати на центральних мітках і на внутрішні кінці надягнути загальну вилку зі штирями. Після цього лінію оглянути для виявлення й ремонту місць ушкоджень ізоляції, "продзвонити" і намотати на катушку.

б) Підготувати провід вимірювальної лінії. З проводу ГПСМПО або іншої придатної марки виготовити два відрізки, довжина яких на 2,5 м більша, ніж $MN/2$ (рис. 4.15, а). Відступивши на 1 м від кінців обох відрізків, поставити початкові мітки, від них відміряти відстань, рівну $MN/2$, і поставити кінцеві мітки. На внутрішні кінці обох відрізків надягнути вилку зі штирями і зв'язати провід так, щоб початкові мітки виявилися біля вузла. До протилежних кінців обох відрізків приєднати стандартні вилки зі штирями.

в) Підготувати заземлення лінії живлення та прийому.

Заземлення лінії живлення виготовити із залізних (сталевих) електродів, кількість і розміри яких варто визначити відповідно до розмірів установки й конкретних умов району робіт. Залізні електроди з'єднати півтораметровими відрізками проводу в чотири зв'язки (заземлення A, A', B', B). До кожної зв'язки приєднати відрізок проводу довжиною 0,5 – 0,7 м, ретельно ізолювавши місце приєднання, і на кінець проводу надягнути вилку зі штирями для з'єднання з проводом живильної лінії.

Заземлення приймальної лінії виготовити з мідних електродів. Для підключення електродів до приймальної лінії приєднати до кожного відрізки проводу довжиною 0,5 – 0,7 м і надягнути стандартні вилки на кінці.

2. Провести площову зйомку ділянки по заздалегідь розбитій мережі профілів та точок спостережень на них. Профілі розбиті за допомогою теодоліта (або бусолі) і прив'язати до наявної

опорної геодезичної мережі. Уздовж профілів на відстані проектного кроку профілювання забити пікети, на яких римськими цифрами позначити номер профілю, а арабськими – номер точки на профілі. Розмір установки, крок спостережень по профілю, а також відстань між профілями вибрати відповідно до конкретних умов навчальної практики.

3. Після закінчення польових робіт перевірити правильність обчислень ρ_{II} повторно.

4. Графічно зобразити результати вимірів. Графічний матеріал включає: графіки ρ_{II} по профілях, карту ізоом і карту графіків ρ_{II} для великого та малого розносів.

5. Дати геологічну інтерпретацію отриманих результатів.

Після закінчення роботи бригада представляє наступні звітні матеріали: 1) польовий журнал; 2) графічний матеріал: графіки позірнього опору ρ_{II} , карту ізоом, карту графіків ρ_{II} ; 3) короткий виклад результатів профілювання з висновками.

4.3.3. Комбіноване електропрофілювання

Комбіноване електропрофілювання (КЕП) застосовують головним чином для пошуків і картування круто нахилених добрепровідних геологічних утворень – жильних рудних тіл, зон тектонічних порушень, пластів антрациту, графіту і т. ін.

Установка комбінованого електропрофілювання (рис. 4.16) складається із двох трьохелектродних зустрічних асиметричних установок AMN і BMN із загальним живильним електродом C , віднесеним у "нескінченність" (відстань електрода C до центра MN у 5 – 10 разів більша, ніж електродів A і B). Електроди A і B розташовані симетрично щодо центра приймальної лінії MN , яка є загальною для обох установок. При розрахунку позірнього опору, вимірюваного трьохелектродною установкою AMN , її коефіцієнт у два рази більший від коефіцієнта симетричної чоти-р'юхелектродної установки $AMNB$, тобто $K = 2\pi AM \cdot AN / MN$.

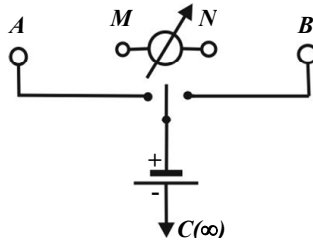


Рис. 4.16. Установка комбінованого електропрофілювання

На кожній точці профілю вимірюються два значення позірною опору – установкою $AMN(C_\infty)$ й установкою $BMN(C_\infty)$. Для кожної установки точку запису відносять до центра MN . У результаті профілювання отримують два графіки ρ_{II} . Сумісний аналіз двох графіків дозволяє більш чітко виявити особливості будови геоелектричного розрізу. Розглянемо це на прикладі, наведеному на рис. 4.17, на якому зображений результат комбінованого електропрофілювання над рудним пластом.

Вплив рудного пласта як тіла, суттєво більш провідного, ніж уміщувальне середовище, на електричне поле обох живильних електродів виражається в тому, що струмові лінії, які є радіальними в однорідному середовищі, відхиляються в бік пласта. Це приводить до того, що біля приймальних електродів M і N аномально збільшується густина струму, що стікає з більш віддаленого від рудного об'єкта живильного електрода, і аномально зменшується густина струму, що стікає з менш віддаленого. Аномальне відхилення густини струму позначається відповідно на збільшенні й зменшенні вимірюваного трьохелектродними установками позірною опору щодо питомого опору уміщувального середовища.

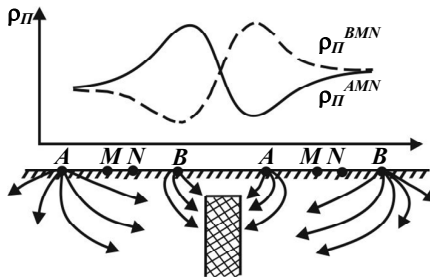


Рис. 4.17. Графік КЕП над провідним рудним пластом

Тому графік ρ_{II} для установки $AMN(C_{\infty})$ ліворуч від рудного об'єкта розташується вище, а праворуч – нижче графіка ρ_{II} установки $BMN(C_{\infty})$. Над пластом обидва графіки перетинаються, утворюючи "рудний перетин". Для випадку, коли об'єкт погано провідний (наприклад, кварцова жила), характер перетину був би протилежний. Такий перетин називається "нерудним". Завдяки цій особливості графіків комбінованого профілювання часто вдається виявляти малопотужні рудні жили, зони розломів та інші провідні утворення, які на графіках симетричного профілювання, особливо в умовах неоднорідного геоелектричного розрізу, відбиваються аномаліями ρ_{II} нечітко або зовсім не відбиваються.

Графіки позірнього опору, побудовані за його середніми значеннями – $\rho_{II}^{cep} = (\rho_{II}^{AMN} + \rho_{II}^{BMN})/2$ згідно з принципом суперпозиції полів, відповідають графікам електропрофілювання симетричною установкою $AMNB$.

Монтажна схема установки. Монтажна схема установки для комбінованого профілювання зображена на рис. 4.18.

Оператор із вимірювачем ЭРП-1 (ЭРА, АНЧ-3, АЭ-72) розташовується в центрі приймальної лінії, куди підведені проводи від заземлень A і B . Генератор вимірювача за допомогою з'єднувального проводу a підключається по черзі до заземлень A і B , а з'єднувальним проводом b через котушки K_1 і K_2 до заземлення C (при невеликих розносах установки використовують одну котушку). Завдяки наявності котушки K_1 електрод C у процесі вимірів залишається нерухомим. Бажано, щоб котушка K_1 була зручною і достатньо легкою для переносу, яку переміщують по профілю разом з вимірювальним приладом. Завдяки цьому спрощується виробничий процес.

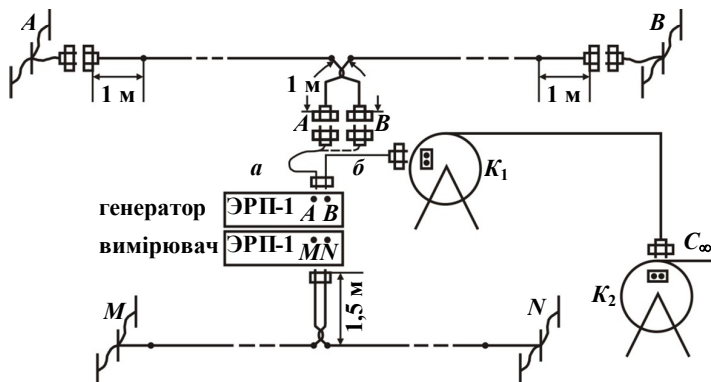


Рис. 4.18. Монтажна схема установки для комбінованого профілювання

Відстань між заземленням у "нескінченності" C і центром установки повинна бути не менше 5-кратної відстані між заземленнями A й B . На практиці для зменшення впливу заземлення C його відносять, по можливості, у перпендикулярному до профілю напрямку, так, щоб цим заземленням можна було користуватися без його переміщення для декількох чи навіть усіх профілів площі зйомки.

Методика польових робіт. Спостереження на точці починаються з виміру сили струму I і різниці потенціалів ΔU при пропусканні струму через заземлення A (трьохелектродна установка AMN – пряме крило установки комбінованого профілювання). Ця ж процедура повторюється й при пропусканні струму через електрод B (установка BMN – протилежне крило установки комбінованого профілювання).

По відомій формулі:

$$\rho_{\pi} = K \frac{\Delta U}{I},$$

де $K = 2\pi \frac{AM \cdot AN}{MN}$, обчислювач підраховує обидва значення ρ_{π} ,

наносить їх на графік і, переконавшись, що хід кривих не порушується, оператор подає команду для переходу на наступну точку. На кожній п'ятій або десятій точці проводяться повторні виміри

ρ_{II} зі зміною опору заземлень A і B . Похибка між результатами основного та повторного вимірів не повинна перевищувати 5%. Одночасно обчислюється середнє значення ρ_{II} .

Для переходу з однієї точки виміру на іншу за командою оператора працівник біля котушки з проводом K_1 відключає вилку з'єднувального проводу b і переносить котушку K_1 до нової точки спостережень, розмотуючи з неї провід, необхідний для переміщення всієї установки на відстань, рівну кроку спостережень, після чого цей з'єднувальний провід знову підключається до котушки K_1 . Працівники на живильних і приймальних електродах переносять їх з одночасним перетягуванням проводів ліній живлення та приймання, заземлюють їх на новому місці та виміри ρ_{II} продовжуються.

Після закінчення вимірів на одному профілі установка переміщується на сусідній. На кожній десятій точці оператор виконує перевірку лінії живлення на витоки струму та величину опору приймальних заземлень.

Результати польових спостережень фіксуються в журналі. У графі "Примітки" записують положення крил установки щодо кінців профілю, замальовують абрис денної поверхні по профілю й відмічають фактори, які можуть вплинути на величину та умови виміру позірного опору. Журнал для запису спостережень при методі КЕП наведений нижче.

Результати польових спостережень зображаються у вигляді графіків позірного опору, на яких різними умовними знаками наносяться обидві криві ρ_{II} і наводиться схема розташування установки на профілі. При цьому умовний знак для кривої ρ_{II} , отриманої установкою прямого ходу AMN , на схемі повинен бути типу " \rightarrow ", а для кривої ρ_{II} , отриманої установкою зворотного ходу MNB – " \leftarrow ".

Ділянка – "Пошукова". Дата – 12.06.2011. Похмуро, сухо.
Профіль – II. Початок спостережень – 8 год 25 хв.
 $K = 1100$ м. Кінець спостережень – 11 год 30 хв.
 $AO = OB = 60$ м. $MN = 20$ м. Крок спостереження = 20 м.
Оператор – Черняк А. В. Обчислювач – Шевченко О. І.

№ точки	AMN			BMN			ρ_n^{cep} , Ом·м	Примітки
	I, mA	ΔU , mB	ρ_n^{AMN} , Ом·м	I, mA	ΔU , mB	ρ_n^{BMN} , Ом·м		
1	80,1	64,1	880	100	135	1485	1182	
2	92	85	1016	99,6	182	2010	1513	
3	84,5	71,4	929	100	188	2068	1499	
4	60	36	660	95	154	1783	1222	

Оператор _____ Обчислювач _____
(підпис) (підпис)

Завдання

1. Змонтувати установку для комбінованого профілювання відповідно до монтажної схеми (див. рис. 4.18). У процесі монтажу необхідно виконати наступні операції:

а) Підготувати провід лінії живлення. Із проводу ГПСМПО або іншої марки виготовити два відрізки, довжина яких на 2 м більша, ніж $AB/2$. Відступивши 1 м від кінців кожного відрізка, поставити мітки й на всі кінці відрізків надягнути вилки з гніздами. Дві половини лінії живлення AB зв'язати таким чином, щоб вузол виявився біля міток, що позначають центр установки. Вилки з гніздами в центрі установки позначити буквами A і B відповідно до того, до якого крила установки вони належать.

На котушку K_2 намотати провід, довжина якого повинна бути не менша п'ятикратної відстані між заземленнями A і B . Внутрішній кінець проводу підключити до панелі котушки, а зовнішній зачистити для приєднання до електродів заземлення C (при значному віддаленні заземлення C від центра установки провід до нього може бути намотаний на декілька котушок, які розміщуються на місцевості послідовно). На котушку K_1 намотати провід довжиною не менше довжини профілю. Внутрішній кінець проводу також підключити до панелі котушки, а на зовнішній надягнути вилку зі штирями. При змотуванні проводу оглянути його для усунення місць пошкодження ізоляції і "продзвонити".

Для підключення генератора до кола живлення виготовити перехідник із двох відрізків м'якого проводу a і b довжиною 2 м кожний. На внутрішні кінці обох відрізків надягнути загальну вилку зі штирями, а на зовнішні кінці (a і b , рис. 4.18) – окремі вилки зі штирями.

б) Підготувати провід вимірювальної лінії. Із проводу ГПСМПО або іншої марки виготовити два відрізки, довжина кожного з яких на 2,5 м більша, ніж піврознос $MN/2$. Відступивши 1 м від початку кожного відрізка і 1,5 м від кінця, поставити мітки. До зовнішніх кінців відрізків приєднати вилки для з'єднання з вимірювальними заземленнями, а на внутрішні кінці надягнути загальну вилку зі штирями для з'єднання з вимірювачем. Виготовлені в такий спосіб дві половини приймальної лінії зв'язати так, щоб вузол виявився біля міток, що відзначають центр установки.

в) Підготувати заземлення лінії живлення й приймальної лінії. При підготовці заземлень керуватися вказівками, приведеними в параграфах, де описується процес підготовки симетричних установок (п. 4.1.1, 4.3.1). Особливу увагу звернути на виготовлення заземлення в "нескінченності". З метою зменшення опору цього заземлення його виготовляють із великої кількості (до 10 – 20 шт.) стандартних залізних електродів. Для запобігання нещасних випадків необхідно виготовити гірляндку з 10 – 15 червоних прапорців і нею відгородити місце заземлення. При роботі в районах із сухим ґрунтовим або кам'янистим поверхневим покривом приготувати насичений розчин кухонної або іншої солі для поливу ділянки, на якій передбачається розмістити заземлення.

2. Провести комбіноване профілювання на ділянці. Розмір установки, крок профілю й відстань між сусідніми профілями вибрати відповідно конкретним умовам навчальної практики.

3. По закінченню вимірів перевірити правильність обчислень у польовому журналі в другу руку.

4. Графічно зобразити результати вимірів. За даними польових спостережень побудувати графіки r_L .

5. Дати геологічну інтерпретацію результатів комбінованого профілювання.

Після закінчення повного циклу робіт з комбінованого профілювання бригада представляє наступні звітні матеріали: 1) польовий журнал; 2) графіки ρ_{II} ; 3) карти ρ_{II} для різних установок (ρ_{II}^{AMN} і ρ_{II}^{BMN}); 4) короткий виклад результатів профілювання.

4.3.4. Профілювання способом серединних градієнтів

Електропрофілювання способом серединних градієнтів (ЕП-СГ) застосовують у районах зі складним геоелектричним розрізом (складнопобудовані рудні поля, райони розвитку карсту та ін.). Електричні неоднорідності біля заземлень живлення можуть суттєво спотворити форму кривої ρ_{II} незалежно від глибинного геоелектричного розрізу, який є предметом електрометричних досліджень. У цій модифікації електропрофілювання живильні електроди A і B залишають фіксованими, а приймальні електроди переміщують уздовж профілів, паралельних лінії AB . Сукупність цих профілів утворює "планшет" (рис. 4.19).

В однорідному середовищі напруженість поля двох точкових джерел мало змінюється в середній третині відстані AB , а тому при спостереженнях над неоднорідними середовищами в цій області можна найбільш чітко виявити характер впливу геоелектричного розрізу на вимірюване поле. Тому довжина профілів при зйомці способом серединних градієнтів не повинна перевищувати однієї третини відстані між живильними електродами. Відстань між крайніми профілями теж береться такою ж у більшості випадків.

Відстань між живильними електродами вибирають, виходячи з геологічної ситуації й необхідної глибини досліджень для вирішення конкретної задачі. Ця відстань повинна в 5 – 10 разів перевершувати необхідну глибину досліджень. Її вибір бажано обґрунтовувати рекогносцирувальними електричними зондуваннями: розмір лінії AB повинен бути таким, щоб геологічні об'єкти, які підлягають дослідженню, знаходилися у відносно однорідному електричному полі.

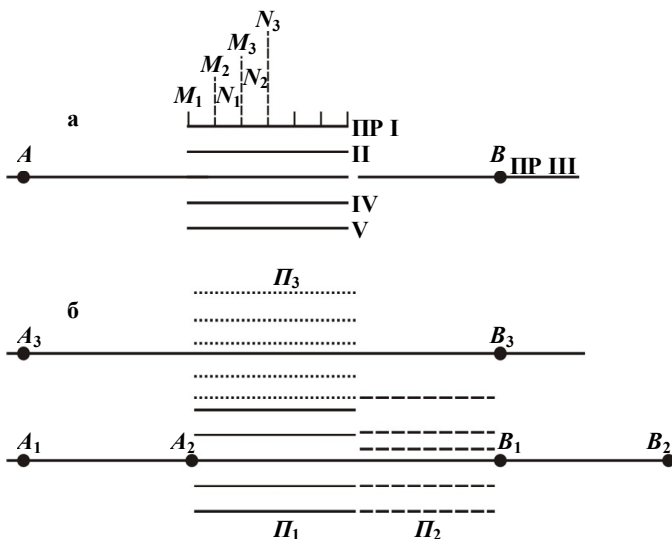


Рис. 4.19. Схема проведення спостережень при профілюванні способом серединних градієнтів:

- а) розташування та переміщення вимірювальних заземлень по профілю;
 б) розташування планшетів; P_1, P_2, P_3 – послідовне розташування планшетів

Рознос вимірювальних електродів M і N визначається розмірами досліджуваних об'єктів, необхідною детальністю досліджень та технічними можливостями генераторного та вимірювального приладів.

Величину позірного опору при зйомці серединних градієнтів відносять до середини лінії MN . При зміні положення приймальної лінії MN буде змінюватися й коефіцієнт установки. Його розраховують за загальною формулою:

$$K = \frac{2\pi}{\frac{1}{AM} - \frac{1}{BM} - \frac{1}{AN} + \frac{1}{BN}},$$

де AM, BM, AN, BN – відстані між відповідними електродами.

Зйомку серединних градієнтів доцільно виконувати з комплектами апаратури ЭРП-1, ЭРА або АНЧ-3 (залежно від розносу живильних заземлень), у складі яких є джерела струму – як генератори, так і вимірювальні прилади.

За результатами зйомки СГ будується карта графіків позірною опору або ж карта ізоом. Першу форму зображення даних застосовують при розповсюдженні в районах досліджень витягнутих (двовимірних) об'єктів. На картах графіків позірною опору рудні провідні об'єкти картуються у вигляді лінійних зон знижених значень $\rho_{\text{п}}$, що чітко корелюються на профільних графіках, а нерудні (погано провідні) – у вигляді лінійно витягнутих зон підвищених значень $\rho_{\text{п}}$. При картуванні поверхні опорного високоомного горизонту негативні форми його рельєфу відмічаються на карті позірною опору областями знижених значень $\rho_{\text{п}}$, а позитивні – підвищених значень $\rho_{\text{п}}$.

Монтажна схема установки. Методика польових робіт

Монтажна схема установки для зйомки серединних градієнтів з апаратурою типу ЭРП-1 практично нічим не відрізняється від схеми симетричної чотирьохелектродної установки *AMNB* (див. рис. 4.13).

Польові операції при зйомці серединних градієнтів проводяться наступним чином: попередньо розбивається топографічна мережа й визначаються на місцевості положення живильних заземлень. Після цього на визначених точках живильних заземлень працівники забивають живильні електроди й розмотують проводи лінії живлення. Оператор із генератором розташовується в центрі живильної лінії та приєднує до неї прилад.

Перед початком безпосередніх вимірів вимірювальною лінією на профілях перевіряється опір живильної лінії для забезпечення в ній достатньої за величиною сили струму. Для цього запускають генератор. При спалахуванні на пульті генератора сигнальної лампочки опір заземлень *A* і *B* зменшують, заглиблюючи електроди або збільшуючи їх кількість у зв'язках. При відсутності спалаху починають виконувати вимірювання на профілі, на якому розміщена приймальна лінія. Для цього вимірювальні заземлення встановлюються на крайньому й сусідньому з ним пікетах профілю. Оператор зі приєднаним до вимірювальної лінії вимірювачем ЭРП-1 розташовується в її

Результати зйомки зображуються у вигляді графіків ρ_{II} по окремих профілях, карт графіків ρ_{II} та карт ізоом для всієї досліджуваної площі або окремих планшетів, побудова й оформлення яких виконуться так само, як і при звичайному профілюванні (див. додаток Б).

Завдання

1. Змонтувати установку для зйомки серединних градієнтів відповідно до монтажною схемою, зображеною на рис. 4.13, керуючися вказівками з монтажу установки для симетричного профілювання (див. пункт 4.3.1 цієї глави).

2. Виконати перевірку й градування генератора та вимірювача відповідно до правил роботи з комплектом ЕРП-1. При зйомці великих планшетів доцільно до генератора підключити зовнішнє джерело великої ємності з напругою 12 – 24 В, наприклад, акумулятор. Зовнішня батарея підключається до клем $\pm AB$ генератора. Слід суворо дотримуватися полярності підключення. Одночасне підключення внутрішнього й зовнішнього джерел напруги неприпустиме.

3. Виконати електричне профілювання ділянки робіт способом серединних градієнтів. Зйомку провести по задалегідь розбитій мережі точок спостережень на площі, розміри якої відповідають двом квадратним планшетам зі сторонами, рівними $AB/3$. Відстань між живильними заземленнями та розміри планшетів вибираються з урахуванням конкретних геологічних умов. Для навчальної практики можна рекомендувати установку, в якій відстань між живильними заземленнями складає 300 м, довжина профілів – 100 м, відстань між профілями – 25 м, кількість профілів на планшеті – 5 (центральний і по два профілі з кожного боку від нього), відстань між приймальними заземленнями та крок установки по профілю – 10 м.

4. Перевірити в другу руку обчислення в польовому журналі.

5. За даними польових спостережень побудувати карту графіків ρ_{II} та карту ізоом покритої зйомкою площі.

6. Дати геологічне тлумачення результатів спостережень.

Після закінчення роботи бригада представляє наступні звітні матеріали: 1) польовий журнал; 2) карту графіків ρ_{II} ; 3) карту ізоом; 4) короткий виклад результатів профілювання.

4.3.5. Дипольне профілювання

Електропрофілювання цим способом виконують звичайно двосторонньою осьовою установкою $ABMN B'A'$ (рис. 4.20), хоча може застосовуватися й одностороння установка $ABMN$. Точкою запису при роботі з такими установками вважається центр приймального диполя MN .

Двостороння дипольна осьова установка характеризується тим, що в ній присутні два живильні диполі – AB і $A'B'$, розташовані симетрично по обидва боки від вимірювального диполя MN . При кожному положенні такої установки на профілі величину позірних опор вимірюють двічі – установками $ABMN$ і $A'B'MN$. Результати вимірів, як уже відмічалось, відносять до центра лінії MN . Дипольна двостороння осьова установка схожа на установку комбінованого електропрофілювання. Схожі й графіки ρ_{Π} , отримані цими установками. Разом з тим ця установка вигідно відрізняється від установки КЕП відсутністю заземлення в нескінченності, що дозволяє суттєво підвищити продуктивність робіт.

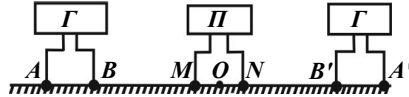


Рис. 4.20. Схема установки дипольного двостороннього електричного профілювання:
 Γ – генератор; Π – вимірювач

Більш повну інформацію про характер геоелектричного розрізу можна отримати шляхом профілювання з дипольно-осьовою дворозносною установкою, що дає можливість оцінити характер зміни геоелектричного розрізу з глибиною (дипольний аналог дворозносного симетричного електропрофілювання).

За результатами виміру позірних опорів будують графіки ρ_{Π} і ρ'_{Π} та графік їх середніх значень $\rho_{\Pi}^{cep} = (\rho_{\Pi} + \rho'_{\Pi})/2$ (у площовому варіанті карти ρ_{Π}^{cep}), на яких чітко картуються наявні локальні неоднорідності геоелектричного розрізу, що мають різну електричну провідність.

Перевага дипольного профілювання в порівнянні з профілюванням у полі точкових джерел полягає в більшій диференційованості графіків ρ_{II} і більшій амплітуді аномалій над локальними об'єктами. Суттєвий недолік ДП полягає в наявності значного рівня завад, зумовлених впливом приповерхневих неоднорідностей та нестабільністю електричного опору вміщуючих порід. Ці обставини обмежують область застосування дипольного профілювання районами з порівняно однорідними покривними і вміщувальними породами.

Монтажна схема установки. Методика польових робіт

Монтажна схема установки дипольного профілювання з апаратурою типу ЭРП-1 передбачає наявність окремих ліній AB і MN (див. рис. 4.13). Схема розташування такої установки наведена на рис. 4.20.

Польові операції при двосторонньому осьовому дипольному профілюванні проводяться наступним чином: попередньо розбивається топографічна мережа точок спостережень – профілів і пікетів на них. На крайньому та сусідньому пікетах профілю встановлюються вимірювальні заземлення приймальної лінії MN . З обох боків від лінії MN на відстанях від її центра до центрів живильних диполів, визначених проектними розмірами установки, працівники розмотують проводи ліній живлення та на їх кінцях заземлюють живильні електроди. Оператор з вимірювачем ЭРП-1 розміщується в центрі вимірювальної лінії, а оператори з генераторами розміщуються в центрах живильних ліній. Генератори та вимірювач підключаються до відповідних ліній.

Спостереження починаються з перевірки опору живильних ліній для того, щоб забезпечити достатню за величиною силу струму в обох диполях. Для цього запускають генератор. Якщо при цьому на пульті генератора спалахує сигнальна лампочка, опір заземлень A і B та A' і B' зменшують, заглиблюючи електроди або збільшуючи їх кількість у зв'язках. Якщо сигнальна лампочка не спалахує, то починають вимірювання $\Delta U/I$, пропускаючи струм послідовно в кожен живильну лінію окремо. Отримані величини $\Delta U/I$ для установок прямого й зворотного ходів записують у журнал, обчислюють значення ρ_{II} , ρ'_{II} та $\rho_{II, \text{середнє}} = (\rho_{II} + \rho'_{II})/2$ і наносять їх на графіки, після чого електрометричну установку переміщують уперед по ходу на крок установки, про-

довжуючи виміри. Указаним способом проводять виміри вздовж усього профілю, після чого установку переносять на сусідній профіль, на якому продовжують виміри в такому ж порядку. На кожній десятій точці виконуються: повторний вимір, перевірка живильних ліній на пошкодження, а також перевірка величини опору приймальних заземлень M і N (див. додаток А).

Результати польових спостережень записують у журнал, форма якого має наступний вигляд:

Ділянка – "Північна". Дата – 21.06.2011. Похмуро, сухо.
Профіль – II. Початок спостережень – 8 год 25 хв.
Кінець спостережень – 11 год 30 хв. Крок спостереження = 20 м.
 $AB = A'B' = 20$ м. $MN = 20$ м. $AO = A'O = 50$ м. $K = 377$ м.
Оператор – Токаренко А. С. Обчислювач – Решетніков Д. І.

№ точки	$AB = 20$ м		$A'B' = 20$ м		$\rho_{п, середнє},$ Ом·м	Примітки
	$\Delta U/I, \text{ Ом}$	$\rho_{п}, \text{ Ом}\cdot\text{м}$	$\Delta U/I, \text{ Ом}$	$\rho_{п}', \text{ Ом}\cdot\text{м}$		
1	0,80	1206	1,35	2034	1620	
2	0,92	1386	1,82	2743	2065	
3	0,84	1266	1,88	2833	2050	
4	0,60	904	1,64	2471	1688	

Оператор _____ Обчислювач _____
 (підпис) (підпис)

Результати польових спостережень зображують у вигляді графіків позірного опору, на яких різними умовними знаками наносяться обидві криві $\rho_{п}$ (прямого та зворотного ходу) і наводиться схема розташування установки на профілі. При цьому умовний знак для кривої $\rho_{п}$ на графіку й для відповідного крила установки (пряма чи обернена) на схемі повинен бути однаковим (типу " \rightarrow ", " \leftarrow ").

Завдання

1. Змонтувати установку для двостороннього дипольного осьового профілювання відповідно до схеми (див. рис. 4.13, 4.20). У процесі монтажу необхідно виконати наступні операції:

а) підготувати проводи ліній живлення. З проводу ГПСМПО або іншої марки виготовити два відрізки, довжина яких на 2 м більша, ніж AB ($A'B'$). Відступивши 1 м від кінців кожного відрізка,

поставити мітки та на всі кінці відрізків, надягнути вилки з гніздами. Під'єднати два відрізки проводу по 1 м до електродів B і B' . Вилки ліній позначити буквами A і B та A' і B' відповідно до того, до якого крила установки вони належать;

б) підготувати провід вимірювальної лінії. З проводу ГПСМПО або іншої марки виготовити відрізки, довжина кожного з яких на 1,5 м більша, ніж рознос $MN/2$. Відступивши на 0,5 м від початку відрізків і на 1 м від їх кінців, поставити мітки. До зовнішніх кінців відрізків приєднати вилки для з'єднання з вимірювальними заземленнями, а на внутрішні кінці надягнути вилку зі штирями для з'єднання з вимірювачем;

в) підготувати заземлення живильної та приймальної ліній. Під час підготовки заземлень керуватися вказівками, приведеними в параграфі 4.3.1 (пункт В) для симетричних установок.

2. Провести двостороннє дипольне профілювання на ділянці. Розмір установки, крок профілю та відстань між сусідніми профілями вибрати відповідно до конкретних умов навчальної практики.

3. Після закінченні вимірів перевірити правильність обчислень у польовому журналі, виконавши повторні розрахунки.

4. Графічно зобразити результати вимірів. За даними польових спостережень побудувати графіки ρ_{Π} .

5. Дати геологічну інтерпретацію результатам комбінованого профілювання.

Після закінчення робіт бригада представляє наступні звітні матеріали: 1) польовий журнал; 2) графіки ρ_{Π} і ρ'_{Π} ; 3) карти ρ_{Π} і ρ'_{Π} для установок прямого й зворотного ходів та $\rho_{\Pi,сер}$; 4) короткий виклад результатів профілювання.

4.3.6. Кругове електропрофілювання

Під круговим профілюванням розуміють вивчення залежності позірного опору ρ_{Π} від азимута лінії розмотки установки при незмінному положенні центра приймальної лінії MN . Дослідження можуть виконуватися за допомогою будь-якої з наведених вище установок. Кругове профілювання застосовують для вивчення анізотропних в електричному відношенні порід – тріщинуватих вапняків, сланців, при виявленні тріщинуватих обводнених зон у кристалічних породах та ін.

Вимірюваний позірний опір анізотропного середовища суттєво залежить від напрямку пропускання струму, а отже від орієнтації установки щодо простягання анізотропних порід.

При круговому профілюванні симетричною установкою $AMNB$ живильні та вимірювальні електроди переміщують навколо центра приймальної лінії MN і при кожному положенні установки на профілі визначають значення позірного опору ρ_{Π} . Результати зображують у вигляді полярної (кругової) діаграми ρ_{Π} , яку отримують шляхом з'єднання кінців масштабних відрізків, якими зображуються значення позірних опорів, виміряних при різних азимутах розмотки установки $AMNB$ (рис. 4.21).

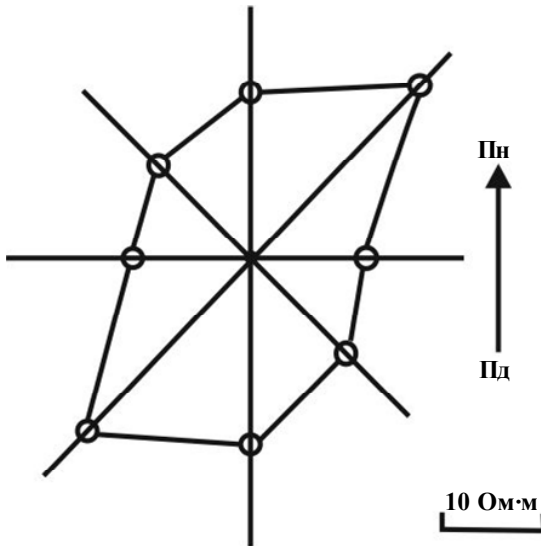


Рис. 4.21. Полярна діаграма ρ_{Π} , отримана симетричною установкою $AMNB$

При наявності анізотропного середовища полярна діаграма має форму еліпса (чи близьку до еліпса). При цьому напрямок його великої осі співпадає з напрямком простягання анізотропної пачки порід. Відношення великої півосі полярної діаграми до малої при крутому падінні анізотропного середовища дає можливість оцінити його коефіцієнт анізотропії λ .

Інкони кругове профілювання виконують на декількох розносах для вивчення поширення анізотропії на глибину.

Для визначення напрямку й оцінки кута падіння виділених у результаті електропрофілювання пластів над ними ставлять кругові профілювання несиметричною установкою AMN . Полярна діаграма ρ_{II} у цьому випадку асиметрична. Зокрема для малопровідного пласта в напрямку його падіння позірний опір більший, ніж у напрямку його підйому, а для пласта з високою провідністю – навпаки. Рівень відмінностей позірного опору в різних напрямках характеризує величину кута падіння пласта (рис. 4.22).

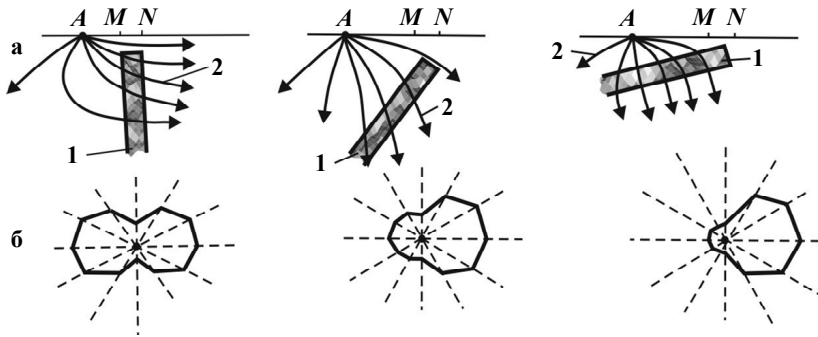


Рис. 4.22. Розташування пласта (а) та полярні діаграми ρ_{II} (б) трьохелектродного кругового електропрофілювання над провідним пластом із різним кутом падіння:
1 – рудний пласт, 2 – струмові лінії

4.3.7. Принципи інтерпретації результатів електропрофілювання

У процесі інтерпретації результатів електричного профілювання на основі даних польових робіт роблять висновок про геоелектричну й геологічну будову досліджуваної площі. Основними матеріалами, що використовуються для інтерпретації, є графіки позірного опору, карти ізоом (рис. 4.23) і карти графіків ρ_{II} (рис. 4.24), які будуються за результатами електропрофілювання, та дані про електричні властивості порід і руд, а також геологічні дані, що є на ділянці робіт та на суміжних ділянках.

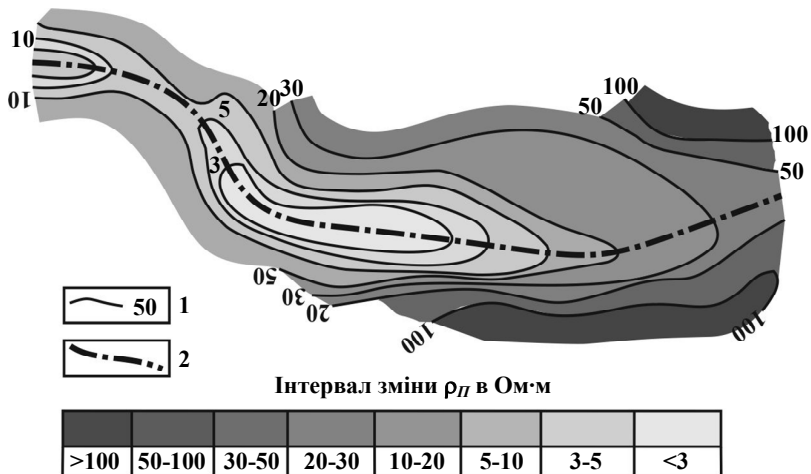


Рис. 4.23. Карта ізоом за даними електропрофілювання:
 1 – лінії рівних значень $\rho_{п}$; 2 – вісь антиклінальної складки

Початковим етапом процесу інтерпретації є виділення на графіках і картах $\rho_{п}$ особливостей, пов'язаних з об'єктами, що мають геологічний інтерес: пластами, рудними тілами, розломами, областями розповсюдження масивів геологічних утворень й т. ін. Цей процес утруднюється впливом на графіки $\rho_{п}$ аномалій-завад як геологічного характеру – неоднорідностей покривних відкладів (якщо вони не є об'єктом дослідження), уміщувальних порід, рельєфу денної поверхні, так і похибок спостережень. Якщо амплітуда корисних аномалій значно більша від амплітуд завад, то аномалії виділяють й корелюють візуально з урахуванням характерних особливостей графіків $\rho_{п}$ (рис. 4.24). При високому рівні аномалій-завад застосовують статистичні методи виділення корисних аномалій та методи їх міжпрофільної кореляції.

Після того, як аномальні зони виділені на графіках і картах позірного опору та дано їм геологічне тлумачення, бажано за характером аномалій уточнити положення цих об'єктів й оцінити, при можливості, елементи їх залягання, розміри і т. ін., тобто виконати кількісну інтерпретацію. Цей етап інтерпретації є досить складним і далеко не завжди можна його реалізувати.

Усе ж таки для простих геологічних моделей, використовуючи палеткові методи співставлення та методи мінімізації, вдається уточнити положення контактів, пластів, жил, рудних об'єктів ізометричної та витягнутої форм, визначити напрямок падіння пластів й оцінити їх кут падіння.

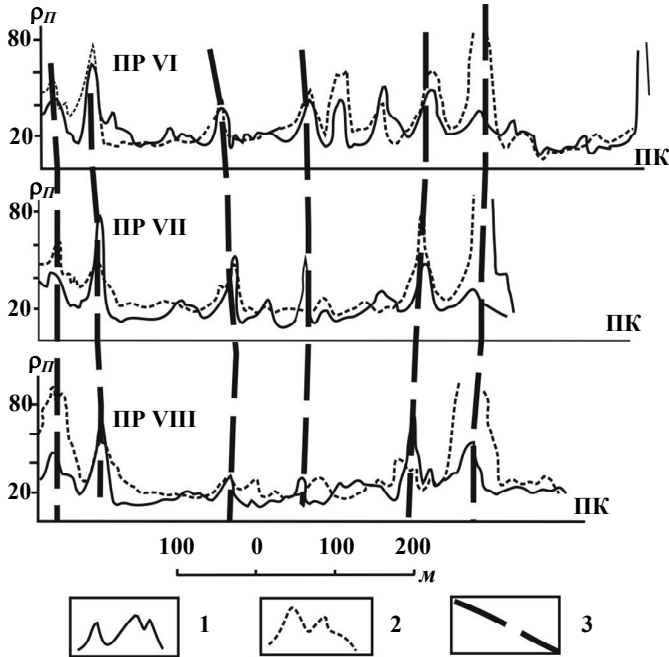


Рис. 4.24. Фрагмент карти графіків позірного опору за даними дворозносного симетричного профілювання на вугільному родовищі: 1 – графіки позірного опору при $AB = 80$ м; 2 – графіки позірного опору при $A'B' = 20$ м, $MN = \text{крок} = 5$ м; 3 – виходи пластів вугілля під наноси

Розглянемо характер графіків ρ_{II} для деяких типових геоелектричних розрізів та відповідні прийоми інтерпретації.

Вертикальний плоский контакт. Припустимо, що вздовж профілю, перпендикулярного лінії контакту, який поділяє пів-простір на два блоки, порід із питомими опорамі ρ_1 і ρ_2 (рис. 4.25) зліва направо (прямий хід) рухається однополюсна градієнт-установка $AMN(C_\infty)$ – установка, в якій розмір прийма-

льної лінії MN настільки малий (із теоретичної точки зору дорівнює нулю), що відношення вимірюваної різниці потенціалів до розміру такої приймальної лінії практично відповідає напруженості електричного поля, тобто градієнту його потенціалу. Однополярність такої градієнт-установки забезпечується тим, що живильний електрод C відноситься на суттєво більшу відстань від приймальних заземлень M і N , ніж інший живильний електрод A (рис. 4.16, п.4.3.3)). Таким чином електричне поле, створюване в точках заземлень M і N електродом C , віднесеним у "нескінченність", нехтувано мале в порівнянні з полем, створюваним електродом A . Отже таку установку фактично можна вважати трьохелектродною.

Якщо позначити відстань від електрода A до лінії контакту через d , а відстань від цього ж електрода до центра приймальної лінії MN через x , то вимірюваний такою однополюсною градієнт-установкою позірний опір ρ_{II} при різних її положеннях щодо лінії контакту описується наступними співвідношеннями:

1) установка повністю знаходиться в середовищі з питомим опором ρ_1 ($d \geq x$):

$$\rho_{II,1}^{(1)} = \rho_1 \left[1 - k_{12} \frac{x^2}{(2d-x)^2} \right] = \rho_1 \left[1 + k_{21} \frac{x^2}{(2d-x)^2} \right];$$

2) електрод A й приймальна лінія MN знаходяться по різні боки від лінії контакту ($0 \leq d \leq x$):

$$\rho_{II,1}^{(2)} = \rho_1(1 + k_{12}) = \rho_2(1 + k_{21});$$

3) установка повністю знаходиться в середовищі з питомим опором ρ_2 ($d \geq 0$):

$$\rho_{II,2}^{(2)} = \rho_2 \left[1 + k_{21} \frac{x^2}{(2d+x)^2} \right] = \rho_2 \left[1 - k_{12} \frac{x^2}{(2d+x)^2} \right].$$

У наведених співвідношеннях k_{12} і k_{21} – коефіцієнти відбиття, які виражаються:

$$k_{12} = \frac{\rho_2 - \rho_1}{\rho_2 + \rho_1}, \quad k_{21} = \frac{\rho_1 - \rho_2}{\rho_2 + \rho_1}, \quad k_{21} = -k_{12}.$$

Верхній індекс у дужках, що стоїть при символі позірного опору в лівих частинах формул, означає індекс середовища, в якому розташоване джерело (електрод A), а нижній – індекс середовища, в якому розташована точка виміру (центр приймальної лінії MN).

Позірний опір, виміряний протилежною (зустрічною) трьохелектродною установкою $BMN(C_\infty)$, що рухається із середовища з питомим опором ρ_2 у середовище з питомим опором ρ_1 , описується аналогічними співвідношеннями, в яких необхідно замінити індекс "1" на індекс "2", а індекс "2" на індекс "1".

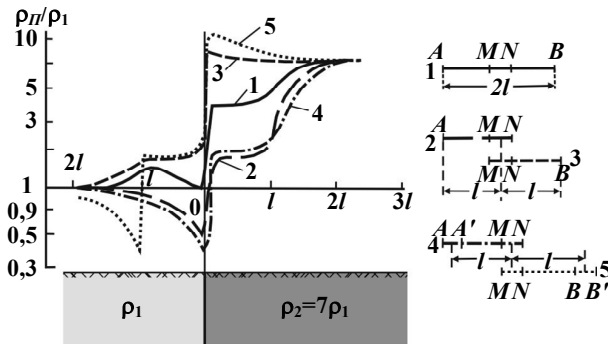


Рис. 4.25. Графіки профілювання через вертикальний контакт різними установками:

установки: 1 – симетрична $AMNB$; 2, 3 – комбінована $AMN(C_\infty)$ і $BMN(C_\infty)$; 4, 5 – двостороння дипольна осьова

Графіки $\rho_{л}$ для установок $AMN(C_\infty)$ і $BMN(C_\infty)$, розраховані за наведеними вище формулами й побудовані з прив'язкою точки запису до середини приймальної лінії, зображені на рис. 4.25 (криві 2 та 3). Це графіки комбінованого профілювання через вертикальний контакт. Характерною особливістю для них є збільшення позірного опору при наближенні вимірювальної лінії до контакту з породами, що мають підвищену провідність, і зменшення позірного опору при наближенні вимірювальної лінії до контакту з більш високоомними породами. Найявнішою є також стрибкоподібна зміна $\rho_{л}$ при переході вимірювальних електродів через контакт. Пояснюються ці особливості графіків профілювання відбивальною дією на електричне поле вертикального контакту та наявністю розриву на контакті нормального (вертикальної до контакту) компоненти напруженості електричного поля.

Графік профілювання симетричною установкою $AMNB$ (крива 1 на рис. 4.25) можна отримати як середнє арифметичне з обох кривих комбінованого профілювання.

На рис 4.25 зображені також графіки профілювання двосторонньою дипольною осьюовою установкою. Розрахункові формули для цих графіків більш громіздкі, вони приведені в [17]. Як видно із рисунка, ці графіки мають більш ускладнену форму. Зокрема графік зворотного ходу для установки $B'BMN$, яка рухається з блоку менш провідних порід у напрямку контакту з породами, які мають підвищену провідність, ускладнений наявністю додаткового стрибкоподібного мінімуму, що виникає під час перетину живильним диполем лінії контакту.

Вертикальний пласт. Припустимо, що провідний півпростір, розташований під денною поверхнею, розділений двома вертикальними плоскопаралельними поверхнями на три частини. Лівий контакт розмежує середовища з питомими опорами ρ_1 і ρ_2 , а правий – з питомими опорами ρ_2 й ρ_3 . Відстань між контактами дорівнює h (товщина пласта). Припустимо також, що на денній поверхні уздовж профілю, ортогонального лініям контактів, зліва-направо (прямий хід) рухається гранична трьохелектродна установка $AMN(C_\infty)$. Якщо позначити через x рознос установки (відстань від електрода A до центра приймальної лінії MN – точки виміру напруженості електричного поля), а через d – відстань цього ж струмового електрода A до ближнього контакту, що розділяє середовища з питомими опорами ρ_1 і ρ_2 , то значення вимірюваного позірною опору можна описати наступною низкою співвідношень, які відповідають різному просторовому розташуванню точок збудження й виміру щодо пласта.

1. Точкове джерело A й точка виміру розташовані в середовищі з питомим опором ρ_1 :

$$\rho_{II,1}^{(1)} = \rho_1 \left\{ 1 - k_{12} \frac{x^2}{(2d-x)^2} - (1 - k_{12}^2) k_{23} \sum_{n=0}^{\infty} \frac{(k_{12} k_{23})^n x^2}{[2d + 2(n+1)h - x]^2} \right\}.$$

2. Точкове джерело A розташоване в середовищі з питомим опором ρ_1 , точка виміру – у середовищі з питомим опором ρ_2 :

$$\rho_{II,2}^{(1)} = \rho_2 (1 - k_{12}) \sum_{n=0}^{\infty} (k_{21} k_{23})^n x^2 \left\{ \frac{1}{(2nh+x)^2} - \frac{k_{23}}{[2(n+1)h + 2d - x]^2} \right\}.$$

3. Точкове джерело A розташоване в середовищі з питомим опором ρ_1 , точка виміру – у середовищі з питомим опором ρ_3 :

$$\rho_{II,3}^{(1)} = \rho_3(1-k_{12})(1-k_{23}) \sum_{n=0}^{\infty} (k_{21}k_{23})^n \frac{x^2}{(2nh+x)^2}.$$

4. Точкове джерело A розташоване в середовищі з питомим опором ρ_2 на відстані d від границі поділу " ρ_1 - ρ_2 ", точка виміру – у середовищі з питомим опором ρ_2 :

$$\rho_{II,2}^{(2)} = \rho_2 \left\{ 1 + \sum_{n=0}^{\infty} (k_{21}k_{23})^n x^2 \left[\frac{k_{21}}{(2nh+2d+x)^2} - \frac{k_{23}}{[2(n+1)h-2d-x]^2} + \frac{k_{21}k_{23}}{[2(n+1)h+x]^2} - \frac{k_{21}k_{23}}{[2(n+1)h-x]^2} \right] \right\}.$$

5. Точкове джерело A розташоване в середовищі з питомим опором ρ_2 на відстані d від границі поділу " ρ_1 - ρ_2 ", точка виміру – у середовищі з питомим опором ρ_3 :

$$\rho_{II,3}^{(2)} = \rho_3(1-k_{23}) \sum_{n=0}^{\infty} (k_{21}k_{23})^n \left[\frac{x^2}{(2nh+x)^2} + \frac{k_{21}x^2}{(2nh+2d+x)^2} \right].$$

6. Точкове джерело A розташоване в середовищі з питомим опором ρ_3 на відстані d від границі поділу " ρ_1 - ρ_2 ", точка виміру – у середовищі з питомим опором ρ_3 :

$$\rho_{II,3}^{(3)} = \rho_3 \left[1 - k_{23} \frac{x^2}{(2d-2h+x)^2} + (1-k_{23}^2) k_{21} \sum_{n=0}^{\infty} \frac{x^2}{(2nh+2d+x)^2} \right].$$

У наведених формулах верхній індекс, що стоїть при символі позірного опору в дужках, означає індекс середовища, в якому розміщене джерело, а нижній – індекс середовища, в якому розташована точка виміру. k_{12} , k_{21} , k_{23} у цих співвідношеннях є коефіцієнтами відбиття:

$$k_{12} = \frac{\rho_2 - \rho_1}{\rho_2 + \rho_1}, \quad k_{21} = -k_{12} = \frac{\rho_1 - \rho_2}{\rho_2 + \rho_1}, \quad k_{23} = \frac{\rho_3 - \rho_2}{\rho_3 + \rho_2}.$$

При профілюванні в протилежному напрямку граничною однополюсною градієнт-установкою $BMN(C_\infty)$ вимірюваний позірний опір визначається аналогічними співвідношеннями, в яких індекс "1" міняється на індекс "3" і навпаки – індекс "3" на індекс "1", а d дорівнює відстані точкового джерела B до лінії вертикального контакту " ρ_3 - ρ_2 ". З урахуванням правила адитивності на основі розрахункових формул ρ_{II} для установок прямого ($AMN(C_\infty)$) та зворотного ($BMN(C_\infty)$) ходів можна отримати розрахункові формули для симетричної градієнт-установки $AMNB$ як середнє арифметичне прямого й зворотного ходів комбінованого профілювання, а також для установки із закріпленими живильними електродами, що застосовується при електропрофілюванні способом серединних градієнтів та дипольних установок.

Якщо в наведених вище формулах покласти $\rho_1 = \rho_3$, тобто $k_{12} = -k_{23}$, то отримаємо співвідношення для розрахунку графіків електропрофілювання над вертикальним пластом, розташованим в однорідному півпросторі. У цьому випадку, наприклад, при розташуванні точкового джерела й точки виміру в уміщувальному середовищі з питомим опором ρ_1 маємо:

$$\rho_{II,1}^{(1)} = \rho_1 \left\{ 1 - k_{12} \frac{x^2}{(2d-x)^2} + (1 - k_{12}^2) \sum_{n=0}^{\infty} (-1)^n \frac{k_{12}^{2n+1} x^2}{[2d + 2(n+1)h - x]^2} \right\}.$$

Характер графіків ρ_{II} над вертикальним пластом суттєво залежить від співвідношення товщини пласта h і розмірів установки l . На рис. 4.26, а зображені графіки позірного опору для різних установок над пластом, опір якого в 7 раз більший за опір уміщувального середовища, а на рис. 4.26, б – над пластом, опір якого в 7 разів менший від опору уміщувального середовища. Пласт тонкий, його товщина в декілька разів менша від розмірів установки. Графіки побудовані з прив'язкою точки запису до центра вимірювальної лінії.

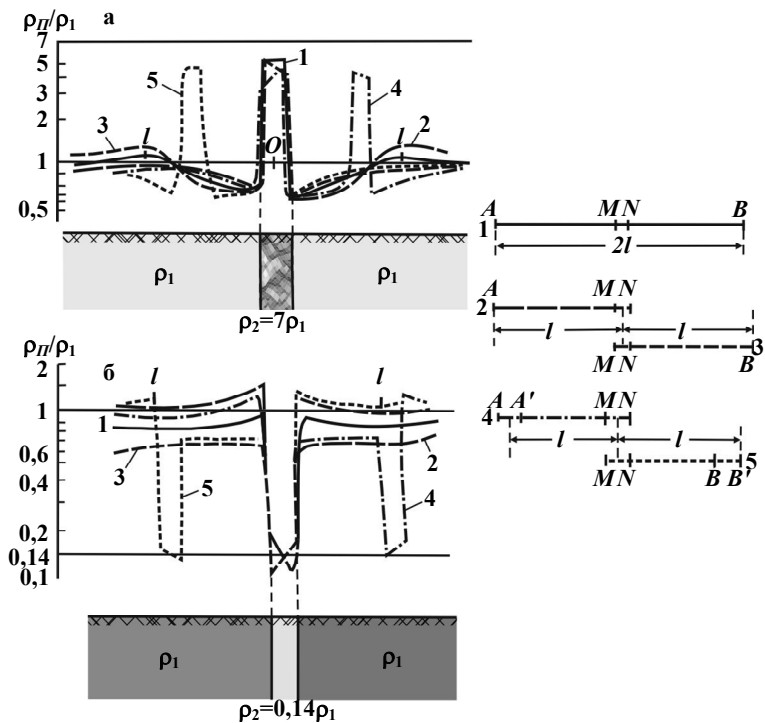


Рис. 4.26. Графіки профілювання різними установками над круто нахиленими малопрвідним (а) та високопрвідним (б) тонкими пластами: установки: 1 – симетрична $AMNB$; 2, 3 – комбінована $AMN(C_\infty)$ і $BMN(C_\infty)$; 4, 5 – двостороння дипольна осьова

Пласт із підвищеною провідністю відмічається на графіках комбінованого профілювання перетином кривих ρ_{II} для установок $AMN(C_\infty)$ і $BMN(C_\infty)$, причому зліва від пласта $\rho_{II}^{AMN} > \rho_{II}^{BMN}$, а справа навпаки. Для кожної із установок, коли їх живильні та вимірювальні електроди знаходяться в різних сторонах від пласта, наявна зона, у межах якої значення ρ_{II} суттєво збільшені. Ширина цих зон близька до AO , де O – центральна точка вимірювальної лінії. У центральній частині аномальної зони на обох графіках спостерігається різке зменшення позірного опору, яке відповідає тому положенню установок, при якому вимірюваль-

ні електроди знаходяться безпосередньо над пластом. Під впливом покривних відкладів графіки можуть бути суттєво згладженими.

При інтерпретації графіків комбінованого профілювання зазвичай визначають лише вісь виходу добре провідного пласта під покривні відклади. Існують способи оцінки глибини залягання верхньої кромки пласта за рівнем підвищеної градієнтності кривих ρ_{II} у зоні перехрестя, а також визначення напрямку падіння за асиметрією кривих (рис. 4.27).

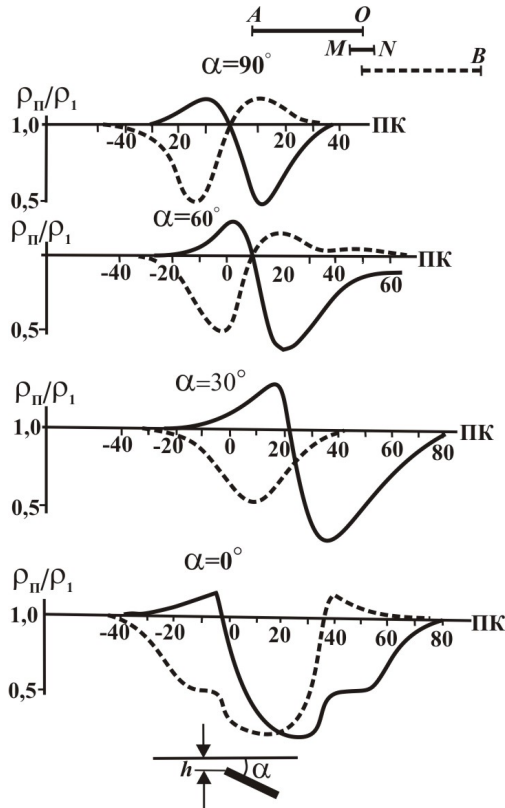


Рис. 4.27. Графіки комбінованого профілювання над тонкою провідною пластинною за результатами фізичного моделювання:
 розмір пластини – 80×80 см; $h = 5$ см; $AO = 20$ см;
 $\alpha = 30^\circ$ – кут нахилу пластини

Графіки двостороннього дипольного осьового профілювання над тонкими пластами в цілому подібні до графіків комбінованого профілювання, за винятком того, що вони ускладнені додатковими аномальними зонами підвищеного (рис. 4.26, а) і зниженого (рис. 4.26, б) опору, які виникають у момент перетину пласта живильними диполями AA' та BB' .

У випадку, коли пласт має підвищений у порівнянні з уміщувальними породами опір, найбільш характерною особливістю кривих комбінованого й дипольного профілювання є наявність безпосередньо над пластом збіжних для обох установок максимумів ρ_{II} . З обох сторін від цих максимумів на відстанях, близьких до розносу установки, наявні додаткові максимуми: зліва – для установки $VMN(C_{\infty})$ і справа – для установки $AMN(C_{\infty})$. При наявності покривних відкладів ці бокові максимуми стають малопомітними. Просторове положення виходу пласта в даному випадку необхідно визначати за накладеними максимумами для обох графіків.

Графіки профілювання симетричною установкою над тонким пластом із підвищеним опором характеризуються наявністю максимуму ρ_{II} безпосередньо над пластом та маловиразних бокових максимумів зліва та справа від пласта на відстанях, що дорівнюють половині розносу l установки (рис. 4.26, а).

На рисунках 4.28 та 4.29 зображені графіки профілювання різними установками над вертикальним погано та добре провідними пластами щодо великої товщини (у даному випадку товщина пласта у два рази більша за рознос установки).

Під пластами відносно великої товщини розуміють пласти з видимою потужністю вздовж профілю спостереження, яка не перевищує 2 – 3-кратну довжину установки.

Як видно із наведених рисунків, графіки позірної опору над пластами значної потужності мають максимум при підвищеному опорі пласта (рис. 4.28) або мінімум – при зниженому (рис. 4.29). З обох боків від основної аномалії спостерігаються екранні аномалії – мінімуми, максимуми, точки перегину, а на контактах пласта спостерігаються піки й западини. Побудовані за даними комбінованого та дипольного профілювання над пластом графіки прямої й зворотної установок перетинаються. При цьому над провідним пластом спостерігається прямий

(рудний) перетин: перехід ρ_{II} із максимуму на мінімум прямої установки й з мінімуму на максимум зворотної установки. Над пластами підвищеного опору перетин кривих протилежний.

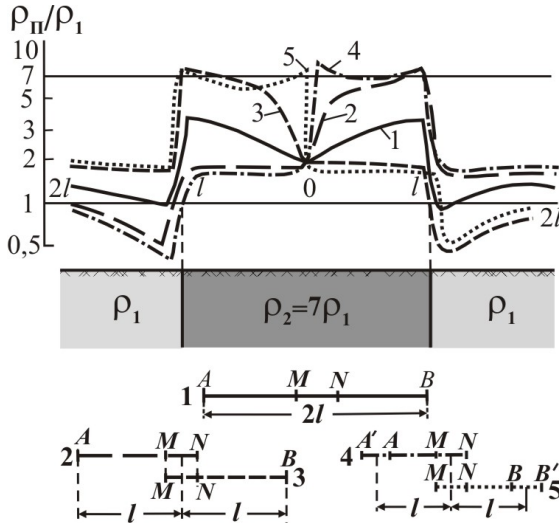


Рис. 4.28. Графіки профілювання різними установками над вертикальним малопрвідним пластом великої товщини (за Блохом І. М.):

установки: 1 – симетрична $AMNB$; 2, 3 – комбінована $AMN(C_{\infty})$ і $BMN(C_{\infty})$; 4, 5 – двостороння дипольна осьова

Графіки двостороннього дипольного й трьохелектродного комбінованого профілювань схожі, а при $AB > 5MN$ співпадають. За їх характерними точками можна виділити видиму товщину пласта. Вона дорівнює відстані між крайніми піками чи западинами на графіку однієї й тієї ж установки.

У цілому для всіх установок у випадку пластів великої товщини характерним є те, що графіки ρ_{II} над контактами пласта із уміщувальними породами досить схожі з графіками ρ_{II} для окремого контакту. Таким чином, визначати границі виходу пласта великої, у порівнянні з розносом установки, потужності можна, користуючись правилами визначення границь окремих контактів.

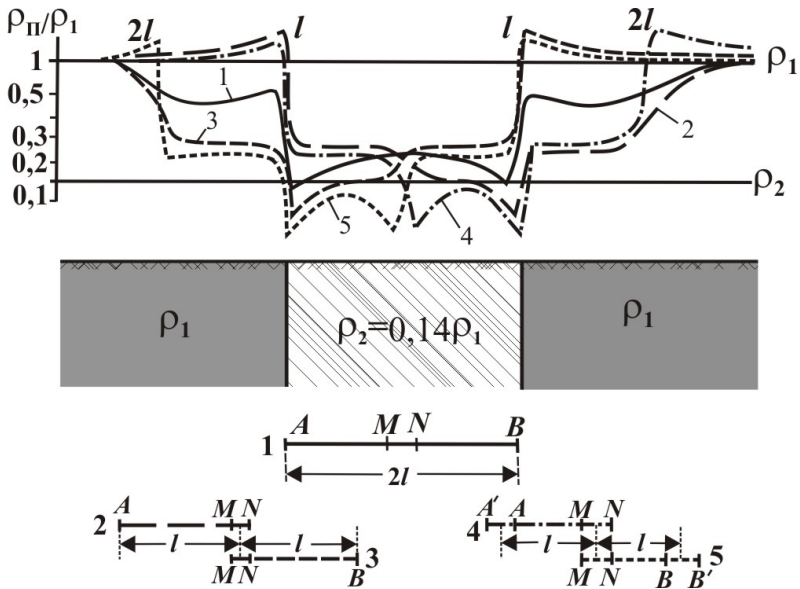


Рис. 4.29. Графіки профілювання різними установками над вертикальним високопровідним пластом великої товщини (за Блохом І. М.); установки: 1 – симетрична $AMNB$; 2, 3 – комбінована $AMN(C_{\infty})$ і $BMN(C_{\infty})$; 4, 5 – двостороння дипольна осяова

При похилому заляганні пласта графіки стають асиметричними, піки й западини стають пологими, а точка перетину зміщується в бік падіння пласта, там відмічається також більша градієнтність у зміні позірнього опору.

Графіки ρ_{II} над пластами, перекритими наносами, стають більш пологими, на них зменшується як кількість характерних точок, так і сама амплітуда аномалій, які практично зникають при потужності наносів, більшій ніж половина розносу установки (для наносів низького опору в порівнянні з корінними породами) або при потужності наносів, більшій за рознос (для високоомних наносів). Амплітуди аномалій несиметричних установок над пластами великої потужності дещо більші, ніж для симетричних.

Ізометричні та витягнуті тіла. Уявлення про характер графіків позірнього опору над тілами ізометричної форми можна отримати, апроксимуючи тіла кулями. У цьому випадку для граничної однополюсної градієнт-установки $AMN(B_\infty)$ формула розрахунку ρ_{II} над кулею, розташованою на глибині h , може бути записана у вигляді [8]:

$$\rho_{II} = \rho_1 \left\{ 1 + 2r \sum_{n=0}^{\infty} S_n \frac{R_0^{2n+1}}{d^{n+1}} (n+1) [R \cdot P_n(\cos\theta) - d \cdot P_{n+1}(\cos\theta)] \right\},$$

де R_0 – радіус кулі; r – відстань між джерелом поля й точкою виміру; R – відстань між центром кулі та точкою виміру поля; d – відстань між центром кулі й живильним електродом A ; θ – полярний кут (кут між напрямками із центра кулі на електрод A та на точку виміру, тобто між R і d); P_n, P_{n+1} – поліноми Лежандра:

$$P_n(x) = \frac{1}{2^n n!} \cdot \frac{\partial^n (x^2 - 1)^n}{\partial x^n};$$

S_n – коефіцієнти, які мають вигляд: $S_n = \frac{n(\rho_2 - \rho_1)}{(n+1)\rho_2 + n\rho_1}$,

де ρ_1 і ρ_2 – питомий опір уміщувального середовища й кулі відповідно.

У випадку ідеально провідної кулі ($\rho_2 = 0$) співвідношення для позірнього опору, виміряного однополюсною градієнт-установкою, суттєво спрощується:

$$\rho_{II} = \rho_1 \left\{ 1 - 2R_0 r^2 \frac{LR_0^2 - (L-r)d^2}{[R_0^4 + d^2 R^2 - 2R_0^2(d^2 - Lr)]^{3/2}} \right\},$$

де L – відстань уздовж радіуса r від живильного електрода A до ортогональної лінії, що перетинає епіцентр кулі.

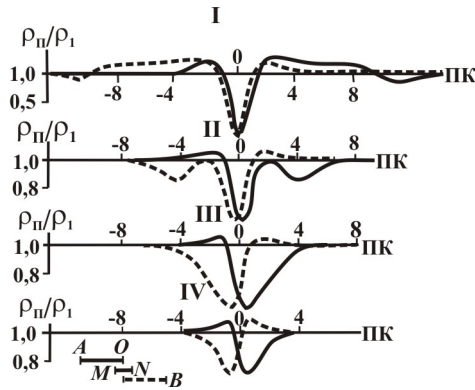


Рис. 4.30. Графіки комбінованого профілювання над ідеально провідною кулею: величини розносів у долях радіуса кулі: I – 10; II – 4; III – 2; IV – 1

На рис. 4.30 зображені графіки комбінованого профілювання установками з різними розносами над ідеально провідною кулею, центр якої залягає на глибині 1,6 її радіуса. На графіках ізометричний добре провідний об'єкт при його малих розмірах (великих розносах установки) відмічається накладеним мінімумом на обох кривих, а при великих розмірах (малих розносах установки) – прямим (рудним) перехрестям кривих і чітко вираженими зонами екранування для обох кривих.

У випадку, коли збурювальним об'єктом є досить витягнуте в горизонтальному напрямку тіло, його можна апроксимувати нескінченно витягнутим циліндром. Співвідношення, що описує електричне поле точкового джерела в присутності циліндричного тіла, є складним. У той же час графіки електропрофілювання над такими об'єктами досить подібні до графіків профілювання над ізометричними тілами.

При аналізі даних електропрофілювання способом середнього градієнта для наближеної оцінки параметрів ізометричних та досить витягнутих у горизонтальному напрямку (двовимірних) збурювальних об'єктів можна скористатися теоретичними співвідношеннями, що визначають позірний опір, вимірний в

однорідному електричному полі над кулею та циліндром. У цьому випадку для ізометричних тіл позірний опір у системі декартових координат, початок яких знаходиться в епіцентрі кулі, а вісь x спрямована вздовж напрямку однорідного поля, має вигляд:

$$\rho_{II} = \rho_1 \left[1 - 2 \frac{\rho_2 - \rho_1}{2\rho_2 + \rho_1} R_0^3 \frac{2x^2 - y^2 - h^2}{(x^2 + y^2 + h^2)^{5/2}} \right],$$

де ρ_1 і ρ_2 – питомий опір уміщувального середовища й кулі відповідно, h – глибина до центра кулі, R_0 – радіус кулі.

У випадку нескінченно витягнутого в горизонтальному напрямку циліндричного тіла з радіусом r_0 , вісь якого знаходиться на глибині h від денної поверхні, співвідношення для позірного опору має вигляд:

$$\rho_{II} = \rho_1 \left[1 - 2 \frac{\rho_2 - \rho_1}{2\rho_2 + \rho_1} r_0^2 \frac{x^2 - h^2}{(x^2 + h^2)^2} \right],$$

де x – координата точки спостереження на ортогональному до напрямку простягання осі циліндра профілі (початок координат знаходиться в точці перетину профілем лінії простягання осі циліндра).

На рис. 4.31 зображені криві електропрофілювання над ідеально провідною кулею, розташованою на глибині $h = 1,6R_0$. Розрахунок кривих виконаний для випадку профілювання в однорідному електричному полі (рис. 4.31, а) та профілювання способом серединного градієнта при знаходженні епіцентра кулі в центрі лінії AB (рис. 4.31, б) і в точці з координатами $x = 0,5R_0$, $y = 0$ (рис. 4.31, в). Графіки розраховані вздовж п'яти профілів, зорієнтованих у напрямку дії однорідного поля та лінії AB (координатний напрямок x) і розташованих на різних відстанях від епіцентра кулі (координатний напрямок y).

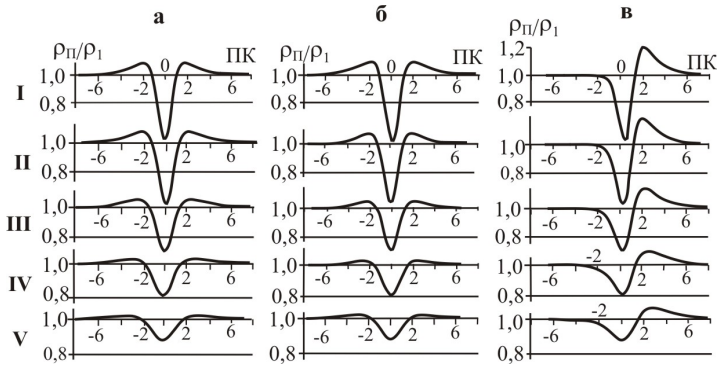


Рис. 4.31. Графіки електропрофілювання над ідеальною провідною кулею в однорідному електричному полі (а) та способом серединного градієнта (б, в): координати профілів: $y/R_0=0$ (I); 0,5(II); 1(III); 1,5(IV); 2(V)

Ілюстрації свідчать, що при знаходженні епіцентра кулі в середині лінії AB графіки профілювання симетричні й при розмірах AB , суттєво більших за радіус та глибину залягання збурювального ізометричного тіла (у нашому випадку $AB/2 = 10R_0$), практично аналогічні графікам електропрофілювання в однорідному електричному полі. При зміщенні епіцентра кулі вздовж лінії AB графіки стають асиметричними, у той же час провідна куля фіксується наявністю чіткого мінімуму.

Аналіз наведених вище співвідношень для позірнього опору в однорідному електричному полі дозволяє запропонувати наступні алгоритми наближеної кількісної інтерпретації симетричних (квазісиметричних) аномалій позірнього опору, отриманих у результаті електропрофілювання за способом серединного градієнта. Зазвичай кількісна інтерпретація застосовується до графіка ρ_{II} , побудованого вздовж інтерпретаційного профілю – профілю, що перетинає центр аномалії (рис. 4.32).

Інтерпретація аномального графіка ρ_{II} починається з визначення глибини h до центра кулі (осі циліндра), оцінку якої можна виконати, реалізувавши декілька алгоритмів. Зокрема, глибина до центра кулі може бути розрахована за наступними співвідношеннями:

$$h = \frac{|x_{10} - x_{20}|}{\sqrt{2}} \approx 0,707|x_{10} - x_{20}|; \quad h = \frac{|x_{1e} - x_{2e}|}{\sqrt{6}} \approx 0,408|x_{1e} - x_{2e}|;$$

$$h \approx 1,93m .$$

Глибина до осі циліндричного тіла визначається згідно з алгоритмами:

$$h = 0,5|x_{10} - x_{20}|; \quad h = \frac{|x_{1e} - x_{2e}|}{2\sqrt{3}} \approx 0,29|x_{1e} - x_{2e}|;$$

$$h = \frac{q}{2\sqrt{\sqrt{5} - 2}} \approx 1,03q; \quad h = 1,46m.$$

Позначення, які використані у наведених алгоритмах, про-ілюстровані на рис. 4.32 й означають: x_{10} , x_{20} – точки перетину графіком лінії ρ_1 ; x_{1e} , x_{2e} – точки бокових екстремумів; q – ширина аномалії на її половинному рівні; m – відстань між точками перетину нахиленої дотичної з лінією ρ_1 та дотичною до головного екстремуму (спосіб параметра m застосовується також і при інтерпретації аномалій природного електричного поля (п. 5.1.3)).

У випадку інтерпретації асиметричних аномалій ρ_{II} способом параметра m визначаються два значення цього параметра – m_1 і m_2 , по лівій та правій нахилених дотичних відповідно, та два значення глибин – h_1 і h_2 . За глибину до центра збурювального тіла приймається їх середнє арифметичне значення: $h = (h_1 + h_2)/2$.

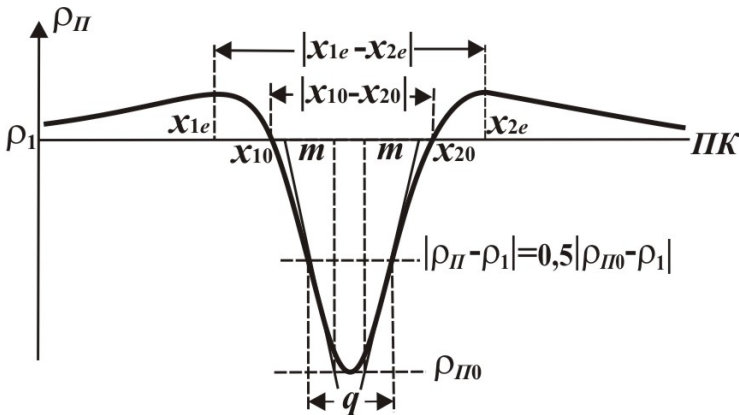


Рис. 4.32. Інтерпретації аномальних графіків позірнього опору в методі ЕП-СГ способами параметрів m і q

Після визначення глибин можна розрахувати радіус кулі R_0 та циліндра r_0 :

$$R_0 = \sqrt[3]{0,5 \frac{|\rho_{\Pi 0} / \rho_1 - 1| \cdot (2\rho_2 / \rho_1 + 1)}{|\rho_2 / \rho_1 - 1|}} \cdot h,$$

$$r_0 = \sqrt{0,5 \frac{|\rho_{\Pi 0} / \rho_1 - 1| \cdot (\rho_2 / \rho_1 + 1)}{|\rho_2 / \rho_1 - 1|}} \cdot h,$$

де $\rho_{\Pi 0}$ – екстремальне значення позірного опору (рис. 4.32).

Як видно із наведених співвідношень, для визначення розмірів тіл необхідно знати питомий опір уміщувальних порід ρ_1 та самого тіла ρ_2 . Щодо питомого опору уміщувальних порід, то його можна визначити за фоновими значеннями вимірюваного позірного опору, у той же час значення ρ_2 апіорі повинно бути відомим. Для цього використовують дані геофізичних досліджень свердловин або ж виміри позірного опору на відслоненнях подібних збурювальних об'єктів, що мають місце в районі робіт.

Для часткових випадків, коли збурювальні тіла є рудними, а отже $\rho_2 \ll \rho_1$, чи навпаки – непровідними (карстові порожнини, кварцові тіла та ін.), для яких $\rho_2 \gg \rho_1$, розрахункові формули, згідно з якими визначаються розміри тіл, спрощуються. Зокрема, формули для розрахунку радіуса ізометричного тіла мають вигляд:

$$R_0 = \sqrt[3]{0,5(1 - \rho_{\Pi 0} / \rho_1)} \cdot h, \quad \text{при } \rho_2 \ll \rho_1,$$

$$R_0 = \sqrt[3]{(\rho_{\Pi 0} / \rho_1 - 1)} \cdot h, \quad \text{при } \rho_2 \gg \rho_1.$$

Формула для розрахунку радіуса як рудного ($\rho_2 \ll \rho_1$), так і непровідного ($\rho_2 \gg \rho_1$) циліндричного тіла одна:

$$r_0 = \sqrt{0,5(\rho_{\Pi 0} / \rho_1 - 1)} \cdot h.$$

4.3.8. Геологічне застосування електропрофільювання

Електричне профільювання в комплексі з іншими геофізичними методами знаходить широке застосування для вирішення різних геологічних задач, коли є диференціація порід за питомим

електричним опором в горизонтальному напрямку. Основними областями застосування електропрофілювання є наступні:

1. Структурно-геологічні дослідження, пов'язані з вивченням похованих структур, глибина залягання яких не перевищує 1 км.

2. Розв'язок задач великомасштабного регіонального й пошукового картування.

3. Виявлення та простежування розривних порушень.

4. Пошуки та розвідка рудних і нерудних корисних копалин.

5. Розв'язок інженерно-геологічних задач.

6. Пошуки обводнених зон, виявлення прісних і мінералізованих підземних вод.

7. Вивчення районів вічної мерзлоти.

При структурно-геологічних дослідженнях електропрофілювання використовується для зйомок у масштабі більше 1:50 000. Найбільше застосування тут знаходять дворозносні установки $AA'MNB'B$.

По картах і графіках позірних опорів виявляються місця знаходження та форма таких структур, як антикліналі, синкліналі, куполи, прогини та ін. Під максимумами чи мінімумами ρ_{II} , залежно від опору досліджуваних горизонтів, який визначається вимірами на різних розносах, розташовуються осі антиклінальних чи синклінальних складок. При цьому, якщо розріз складається із трьох чи більшої кількості горизонтів, то аналізуються карти ρ_{II} при різних розмірах живильних ліній.

Для геологічного картування та виявлення розривних порушень електропрофілювання застосовується в більшості при пошукових (масштаби 1:50 000 – 1:10 000) та пошуково-розвідувальних (масштаби 1:10 000 – 1:1 000) зйомках.

По картах, графіках ρ_{II} та кореляційних планах проводиться виявлення контактів, шарів різного літологічного складу, картування скидів, насувів, зон подрібнення і т. ін., ув'язка їх з геологічними картами та розрізами.

На рис. 4.33 приведений приклад застосування електропрофілювання з метою картування в умовах наявності наносів із потужністю до 5 м і майже повній відсутності відслонень. За таких умов вести звичайну геологічну зйомку досить складно. Електропрофілювання, супроводжуване незначним обсягом

бурових робіт, дозволило успішно провести геологічне картування й виявити не тільки місцезнаходження контактів порід різного літологічного складу, але й наявність тектонічних порушень.

Як видно із рис. 4.33, рифогенні вапняки на графіку ρ_L виділяються дуже високими позірними опором (>1000 Ом·м), бітумінозні вапняки характеризуються меншим опором (300 – 1500 Ом·м), а глинисті сланці – низьким (<1000 Ом·м). У результаті аналізу літології району та отриманого графіка позірнього опору вдалося виявити ряд скидів. Як правило, зони тектонічних порушень виділяються мінімумами ρ_L , оскільки до них прилягають ділянки тріщинуватих, зруйнованих порід, а заповнювач тріщин і підземні води в них, маючи хорошу електропровідність, приводять до зменшення позірнього опору в цих зонах.

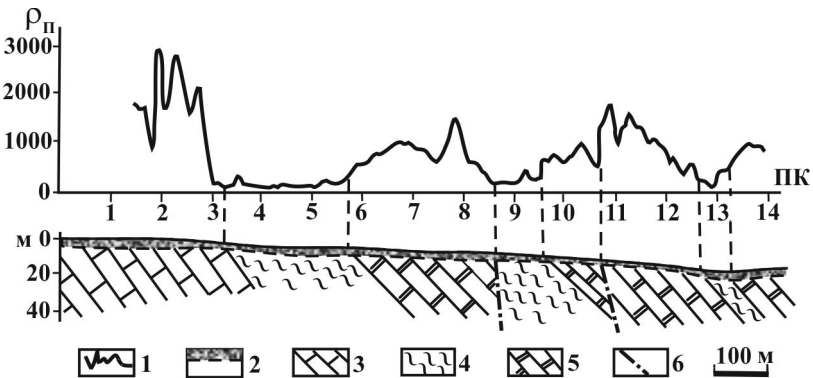


Рис. 4.33. Приклад застосування електропрофілювання для геологічного картування (за В. К. Хмелевським):

- 1 – графік ρ_L , отриманий симетричною чотирьохелектродною установкою з $AB = 600$ м; 2 – четвертинні глини; 3 – рифогенні вапняки; 4 – глинисті сланці; 5 – бітумінозні вапняки; 6 – скиди

Пошуки та розвідка рудних та нерудних корисних копалин виконуються в масштабі більше 1:10 000. При цьому за даними електропрофілювання не тільки ведеться безпосередній пошук і розвідка тіл жильної, лінзоподібної, ізометричної та інших форм, але й геологічне картування родовищ, виявлення структур, сприятливих для рудонакопичення (синкліналей, контактів із виверженими породами, зон подрібнення і т. ін.).

Безпосередня розвідка рудних і нерудних тіл часто ускладнена неоднорідністю електричних властивостей наносів та корінних порід. Це приводить до того, що за даними електропрофілювання виявляються як "рудні" аномалії, так і "нерудні", пов'язані, наприклад, із зонами порушень, обводнень та тріщинуватості. У цьому випадку для відокремлення "рудних" аномалій від "нерудних" необхідно застосовувати інші геофізичні, а також геохімічні й геологічні методи.

Широке застосування електропрофілювання знаходить при вирішенні інженерно-геологічних та гідрогеологічних задач. При інженерно-гідрогеологічних дослідженнях за допомогою електропрофілювання виділяються під наносами скельні породи (чим ближче до поверхні вони залягають, тим більший позірний опір), контакти різних літологічних комплексів, ділянки тріщинуватих, зруйнованих й обводнених порід (за екстремумами знижених значень ρ_{II}), переzagлиблені долини рік, озерних западин і т. ін. Якщо розноси установки профілювання $AB/2$ суттєво більші за глибину до скельних порід, то за результатами виміру позірного опору можна визначати сумарну поздовжню провідність наносів S за формулою $S = (AB/2)/\rho_{II}$ та при відомому їх середньому поздовжньому опорі ρ_I – глибину h до поверхні скельних порід: $h = S \cdot \rho_I$.

При картуванні глибоких карстових порожнин, зон тріщинуватості, закарстованості максимумами ρ_{II} виділяються зони від-критої пустотності. Якщо тріщини заповнені продуктами руйнування порід чи підземною водою, то закарстовані тріщинуваті породи виділяються мінімумами ρ_{II} . Практика застосування електропрофілювання в цьому випадку свідчить, що щільні монолітні вапняки виділяються високими опорами (1000 – 2000 Ом·м), вапняки слабо тріщинуваті відрізняються меншим опором (400 – 1200 Ом·м), а тріщинуваті закарстовані ділянки ще більш низьким опором (200 – 400 Ом·м). Інтенсивність аномалій вища на більших розносах, ніж на менших. Це досить часто спостерігається при вивченні тріщинуватості скельних порід і пояснюється згладжувальним впливом на ρ_{II} вивітрювання верхніх горизонтів, яке сильніше проявляється на менших розносах.

Застосування електропрофілювання для картування багаторічної мерзлоти ґрунтується на тому, що при від'ємних температурах збільшується льодянистість порід, тобто кількість вільної води, що перейшла в лід, а отже, як наслідок, опір порід. Тому ділянки мерзлих порід виділяються максимумами ρ_{II} , а розталих – мінімумами. Геоелектричні умови в районах багаторічної мерзлоти значно складніші, ніж в умовах, де мерзлота відсутня, що звужує можливості електророзвідки. Це пояснюється дуже високим (сотні тисяч омметрів) і нестійким за глибиною та простяганням опором пухких, обводнених порід, різним опором одних і тих же порід при зміні їх температури, пористості, вологості та іншими факторами. Необхідно відмітити, що в умовах багаторічної мерзлоти складно забезпечити якісні заземлення як живильних, так і приймальних електродів. У зв'язку з цим при електропрофілюванні часто виміри ρ_{II} виконують безконтактним способом за допомогою розкладених на землі генераторної, що живиться високочастотним струмом, та приймальної антен (відрідків проводів). Дана модифікація електророзвідки отримала назву метод "безконтактного виміру електричних потенціалів (БВЕП)".

При пошуках обводнених зон та виділенні прісних і мінералізованих підземних вод електропрофілювання застосовується в комплексі з електричними зондуваннями. На графіках і картах обводнені зони виділяються мінімумами позірних опорів, приуроченими до ділянок пористих, тріщинуватих, закарстованих порід, тектонічних порушень. Скупчення прісних вод відрізняються підвищеними опорами порівняно з мінералізованими. Цей критерій може використовуватися й при вирішенні екологічних задач, зокрема при картуванні зон хімічного забруднення, які пов'язані зі скупченням у верхній частині розрізу ґрунтових вод з підвищеною концентрацією солей.

У комплексі із зондуваннями електропрофілювання може застосовуватися при морських електрометричних роботах. Цими методами на акваторіях мілководних морів можуть виявлятися структури, перспективні на нафту, газ і деякі інші корисні копалини.

Електропрофілювання дипольною екваторіальною установкою може застосовуватися при гідрографічних роботах для визначення підводного рельєфу в міжгалсовому просторі, тобто між кораблями, що йдуть паралельними курсами (галсами),

на одному із яких розташований живильний, а на іншому – приймальний диполь. При цьому можна не тільки виявити різкі підняття, але й оцінити їх глибину від поверхні. Оскільки опір порід, що складають підводні гори, у 10 – 100 разів більший, ніж опір води ρ_B , то в першому наближенні геоелектричний розріз можна вважати двошаровим з $\rho_2 = \infty$. У цьому випадку при відстані r між диполями, яка у 2 і більше разів перевищує глибину залягання дна h , цю глибину можна визначити за формулою: $h = r\rho_B / \rho_{II}$. Для перевірки результатів такої інтерпретації необхідно частину профілів спостережень перевірити ехолотуванням чи промірами глибин.

4.4. Метод зарядженого тіла

При розвідці родовищ корисних копалин і геолого-структурних дослідженнях доводиться вирішувати задачу вивчення й визначення просторового положення геологічних утворень, розкритих гірськими виробками, свердловинами або ерозією. Ця задача може бути вирішена за допомогою методу зарядженого тіла або методу заряду (МЗТ або МЗ), що застосовується для простежування й оконтурювання геологічних утворень, розкритих гірськими виробками або свердловинами в одній чи декількох точках, якщо ці утворення складені гірськими породами чи рудами, що мають підвищену у порівнянні із уміщувальними породами електропровідність. Відомі *електрична* (МЗЕ) й *магнітна* (МЗМ) модифікації методу заряду та його *гідрогеологічний* і *міжсвердловинний* варіанти. У даному посібнику ми розглянемо електричну модифікацію методу заряду.

У рудному тілі, перетнутому свердловиною, розміщують один з електродів живильної лінії. Інший електрод розташовують на поверхні землі, відносячи на достатньо велику відстань (у 10 – 15 разів більшу за лінійні розміри площі досліджень), щоб його полем можна було знехтувати. Після вмикання в живильну лінію джерела струму "заряджене" рудне тіло саме стає джерелом електричного поля, просторова структура якого залежить від форми рудного об'єкта (рис. 4.34, а). Це поле вивчають на поверхні землі і в сусідніх свердловинах шляхом зйомки його потенціалу або градієнта потенціалу.

Існують два способи вимірів електричного поля: простежування екіпотенціальних ліній над зарядженим тілом та виміри потенціалу чи градієнта потенціалу вздовж системи профілів, розташованих над зарядженим тілом. Перший спосіб використовують головним чином для вивчення тіл ізометричної форми, а другий – для дослідження лінійно витягнутих круто нахилених тіл жильного та пластового типів.

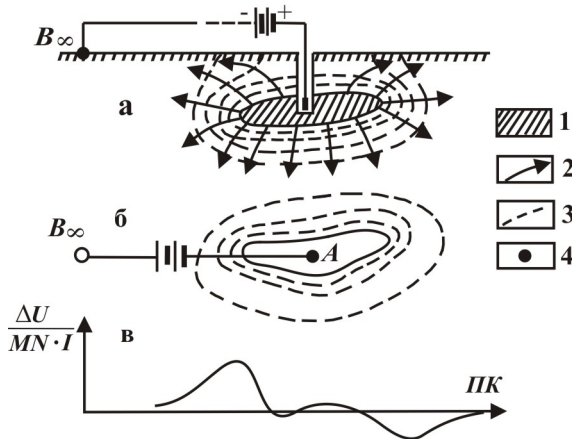


Рис. 4.34. Електричне поле зарядженого рудного тіла:

- а – струмові й екіпотенціальні лінії навколо зарядженого тіла;
- б – екіпотенціальні лінії на денній поверхні;
- в – графік градієнта потенціалу; 1 – заряджене тіло; 2 – струмові лінії;
- 3 – екіпотенціальні лінії; 4 – точка зарядки

Принципова схема установки для роботи методом зарядженого тіла зображена на рис. 4.35. Живильне коло цієї установки складається з двох заземлень A і B , з яких одне заземлене безпосередньо в заряджуваному тілі, а друге віднесене в "нескінченність". Як джерело струму використовується генератор змінного струму з комплекту ЭРА або ЭРП-1.

Приймальна лінія складається з двох заземлень M і N , виготовлених у вигляді тонких загострених шупів із дерев'яною ручкою, підключених до входу вимірювального приладу типу ЭРП-1.

Монтажна схема установки зображена на рис. 4.36. Для приєднання одного з полюсів генератора змінного струму до заземлення в заряджуваному тілі з проводу ГПСМП або ГПСМПО виготовля-

ється лінія, довжина якої визначається відстанню між генератором і точкою зарядки. Другий полюс джерела струму приєднується до заземлення в "нескінченності" за допомогою проводу, намотаного на котушки відрізками по 1000 м. Для приєднання першої котушки до гнізда A генератора виготовляється сполучний провід із вилокми на кінцях. Внутрішні кінці проводів, намотаних на котушках K_1, K_2 і т.д., приєднуються до гнізд на щоках котушок, а на протилежні кінці надіваються вилки зі штирями.

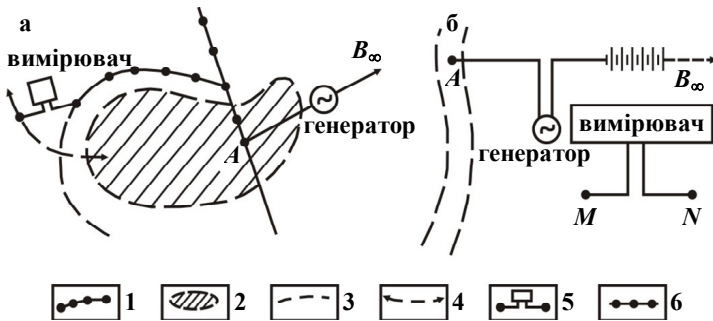


Рис. 4.35. Принципова схема установки в методі заряду для дослідження еквіпотенціальних ліній (а) і для виміру градієнтів потенціалу (б):

- M і N – вимірювальні щупи; 1 – простежена частина ізоляції;
 2 – заряджене тіло; 3 – передбачувані напрями ізоляції й пласта;
 4 – напрямок переміщення переднього щупа; 5 – пошуковий ланцюг;
 6 – базисний профіль

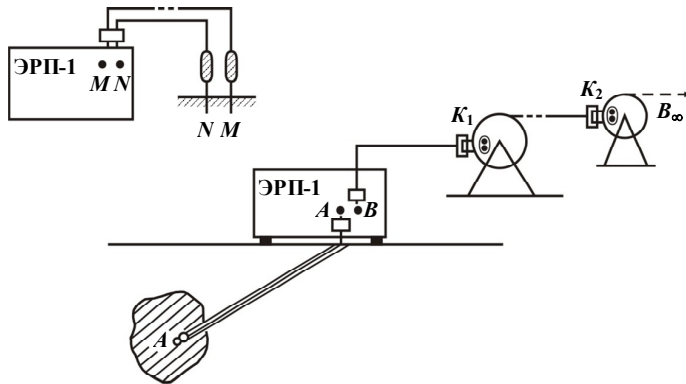


Рис. 4.36. Монтажна схема установки в методі заряду для дослідження еквіпотенціальних ліній

Заземлення в "нескінченності" виготовляється у вигляді 5 – 10 зв'язок з 3 – 5 електродів (залежно від умов заземлення). Навколо заземлення виставляються попереджувальні червоні прапорці для уникнення випадкового ураження людей струмом.

Пошуковий ланцюг монтується з двох відрізків проводу ГПСМПО або ПСРП. Обидва відрізки підключаються до різних гнізд загальної польової вилки (рис. 4.36). Кінці відрізків надійно (бажано за допомогою пайки) приєднуються до щупів пошукового ланцюга.

4.4.1. Зйомка способом екіпотенціальних ліній

Ізолінії рівних потенціалів простежують наступним чином: спочатку на профілі, що перетинає гирло свердловини (проекцію точки зарядки), вибирають початкові точки ізоліній (частіше за все рівновіддалені) і при пропусканні струму вимірюють їх потенціали щодо вибраної базисної точки. Слідкувати за кожною ізолінією починають із її початкової точки й виконують це за допомогою щупів M і N , між якими фіксують вимірювачем нульову (мінімальну) різницю потенціалів.

Операції з пошуковим ланцюгом починаються з того, що задній щуп його встановлюють на початковій точці ізолінії, а передній виносить уперед у передбаченому напрямку цієї ізолінії на відстань, що має назву крок пошукового ланцюга, і заземлюється. У тому випадку, коли щупи виявилися в точках із різними потенціалами, вимірювач ЕРП-1 зафіксує наявність різниці потенціалів між щупами пошукового ланцюга. Завдання оператора полягає в тому, щоб, переміщуючи передній щуп пошукового ланцюга в перпендикулярному до передбачуваного напрямку ізолінії напрямі, добитися нульового або мінімального показу вимірювального приладу. Точка, в якій при цьому буде заземлений передній щуп, виявиться на тій же ізолінії, на якій розташований задній щуп.

Для подальшого трасування ізолінії працівник на задньому щупі переносить його в точку розташування переднього щупа, а оператор із вимірювачем і відповідним щупом зміщується вперед на крок пошукового ланцюга й відшукує нову точку ізолінії.

Процес послідовного трасування ізолінії продовжується твким же чином. Знайдені точки ізолінії закріплюються на місцевості пікетами з указаними на них номерами ізолінії та точки. За бригадою, що простежує ізолінію, прямує топографічна бригада, яка за допомогою бусолі й мірної стрічки виконує топографічну зйомку ізолінії для наступного нанесення її на план. На сучасному етапі точки спостережень можуть прив'язуватись до місцевості за допомогою системи GPS.

Для підвищення точності топографічних робіт на досліджуваній площі бажано заздалегідь за допомогою теодоліта розбити опорну мережу профілів. У цьому випадку при прослідковуванні ізоліній необхідно на місцевості визначати точки їх перетину з профілями опорної мережі, а при топографічній зйомці в графі "Примітки" відмічати пікет цих точок. Окрім цього, у графі "Примітки" фіксуються поверхневі умови, які можуть вплинути на форму ізоліній: характер рослинного покриву, заболоченість, рельєф і т. ін.

Після закінчення зйомки однієї ізолінії виконується зйомка наступної ізолінії, починаючи також із базисного профілю, і т. д.

Відстань між початковими точками ізоліній на базисному профілі вибирається відповідно до передбачуваних розмірів рудного тіла й необхідної детальності робіт. Бажано заздалегідь виконати вздовж базисного профілю виміри градієнта потенціалу та на основі цих вимірів відстані між ізолініями на базисному профілі вибрати такими, щоб різниця потенціалів між сусідніми ізолініями була однаковою для всіх простежуваних ліній.

Результати зйомки ізоліній потенціалу записуються в журнал, форма якого наведена нижче.

Крок пошукового ланцюга визначається кривизною ізоліній і детальністю досліджень. За рішенням оператора він може змінюватися в межах від 10 м до 20 м. Одночасно на планшеті можуть працювати декілька спостерігачів із пошуковими ланцюгами й відповідна кількість топографічних бригад.

Результати зйомки зображують у вигляді карти екіпотенціальних ліній (рис. 4.34, б). Екіпотенціальні лінії наносяться на карту за вимірними в полі відстанями між точками екіпотенціальних ліній та азимутами напрямку з однієї точки на іншу.

При побудові карти ізоліній можливі похибки двоякого характеру: похибки топографічної зйомки та похибки визначення положення точок ізолінії на місцевості (похибки оператора). Указані похибки проявляються в тому, що еквіпотенціальні лінії можуть виявитися незамкнутими кривими. виправляються похибки наступним чином:

Нехай графічна нев'язка (розрив між початком і кінцем ізолінії на базисному профілі M_1M_2) виявилася рівною a (рис. 4.37). Цю нев'язку слід графічно розкидати по всій ізолінії. Для цього точки ізолінії необхідно змістити в бік, протилежний напрямку зміщення кінця ізолінії щодо її початку, причому зміщення по профілях, як це показано на рисунку, має бути рівним $k \cdot (a/n)$, де n – число перетинів еквіпотенціальної лінії з профілями опорної мережі; k – номер перетину, якщо прийняти початок ізолінії за нульовий перетин.

Ділянка – "Сторожинецька". Дата – 17.08.2013. Ясно, сухо.

Початок спостережень – 7 год 15 хв.

Кінець спостережень – 15 год 48 хв.

Положення точки зарядки: – сверд. 8, глибина = 83,5 м.

Положення віддаленого заземлення – 2000 м на північний схід від точки зарядки.

Оператор – Богачук К. О.

Топограф – Грищинчук В. С.

Номер ізолінії	Номер точки	Азимут, градус	Відстань, м	Примітки
3	1	65	10,0	Пр. II, ПК 3 + 5 м
	2	68	8,5	
	3	72	7,3	

Оператор _____ Топограф _____
(підпис) (підпис)

Усі вказані побудови виконуються на окремому аркуші паперу, на план наноситься виправлена ізолінія. Ізолініям присвоюються величини потенціалів, отримані за результатами вимірів потенціалів уздовж базисного профілю. Потенціал однієї з точок базисного профілю умовно приймається рівним нулю, і щодо нього визначаються потенціали всіх інших точок.

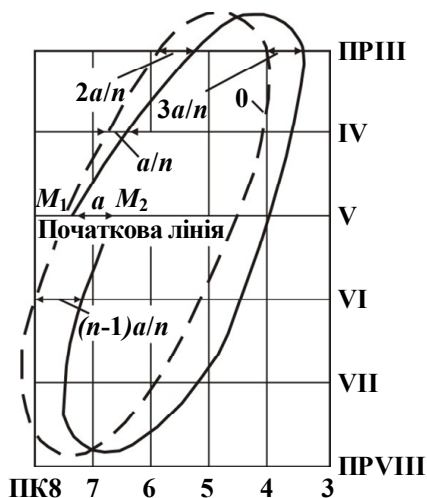


Рис. 4.37. Виправлення похибок при побудові карти еквіпотенціальних ліній:

суцільна лінія – за результатами вимірювань,
пунктирна лінія – із внесеною поправкою

Крім ізоліній, на план наносяться: опорна геодезична мережа, геологічні дані, положення точки зарядки та план розташування живильного проводу, а також спрощена топографічна схема ділянки досліджень.

Завдання

1. Змонтувати установку для дослідження еквіпотенціальних ліній над зарядженим тілом відповідно до схеми на рис. 4.36.

2. Виконати зйомку ізоліній над зарядженим тілом. Зйомку необхідно виконати двічі при різному положенні точки зарядки для того, щоб з'ясувати вплив положення цієї точки на характер спостережуваного поля. Заздалегідь на ділянці зйомки має бути розбита опорна мережа профілів.

3. За отриманими даними побудувати карту еквіпотенціальних ліній над зарядженим тілом. Якщо зарядка виконувалася в різних точках досліджуваного тіла, нанести на карту різними умовними знаками дві системи ізоліній. Карту оформити згідно з приведеними вище вказівками та прикладами.

4. Дати геологічне тлумачення отриманим результатам, тобто визначити за цими результатами положення зарядженого тіла, його вірогідну форму й розміри.

Після закінчення роботи бригада представляє наступні звітні матеріали: 1) польові журнали; 2) карту еквіпотенціальних ліній над зарядженим тілом; 3) коротке геологічне тлумачення отриманих результатів.

4.4.2. Зйомка градієнта потенціалу

Принципова схема установки для вимірів градієнта потенціалу зображена на рис. 4.35, б.

Виміри цим способом починаються із топографічної підготовки ділянки робіт. Над зарядженим тілом уздовж імовірного його простягання розбивають *базисний профіль*, що проходить безпосередньо над точкою зарядки, і перпендикулярно йому систему рядових профілів, віддалених один від одного на 20 – 40 м, на яких пікетами відзначаються майбутні точки для вимірювальних заземлень. Крок вимірювальної установки по профілю й довжина профілів прямо залежать від глибини залягання верхньої кромки зарядженого тіла. Наступна операція полягає в розгортанні живильної лінії. Вимірювання виконуються на постійному струмі.

Виміри градієнтів потенціалів уздовж профілів починаються з того, що вимірювальні заземлення встановлюються на перших двох точках профілю так, щоб заземлення M розташовувалося перед заземленням N . Після цього вимірюються різниця потенціалів ΔU між точками M і N , а також сила струму I в лінії живлення. У тому випадку, коли точка зарядки приєднана до полюса "+" джерела живлення, сила струму завжди береться з додатним знаком. Після виконання виміру заземлення M переноситься на наступну точку профілю, а заземлення N – на точку заземлення M . При новому положенні заземлень знову вимірюються ΔU й I , і заземлення знову переносяться на наступні точки. Так виконуються виміри на всьому профілі. Генератори типу ЭРП-1 (ЭРА) дозволяють зберігати сталість сили струму в лінії AB .

За вимірними силою струму й різницею потенціалів між сусідніми точками профілю, а також за відомою відстанню між точками M і N обчислюється нормоване по струму значення градієнта потенціалу $\Delta U/(I \cdot MN)$.

Результати спостережень на окремих профілях ув'язуються між собою за допомогою виміру різниць потенціалів уздовж замкнутого ходу, що включає початки та кінці всіх профілів, а також два крайні профілі. Правила визначення похибки у спостереженнях уздовж замкнутого ходу і вздовж окремих профілів, а також урахування цих похибок у даному випадку аналогічні правилам, що застосовуються при обробці спостережень методом природного поля. Вони приведені в розділі 5 цього посібника.

Результати вимірів і обчислень записуються в журнал, форма якого наведена нижче.

Ділянка – "Західна". Дата – 18.06.2010. Після дощу.
Положення точки зарядки – шурф 4.
Початок спостережень – 8 год 00 хв.
Кінець спостережень – 18 год 15 хв.
Положення віддаленого заземлення – 3200 м на півд.-зах. від
точки зарядки. $MN = 20$ м. Крок спостереження = 20 м.
Оператор – Сухова І. А. Обчислювач – Радецька О. С.

Номер пікету	ΔU , мВ	I , сА	$\Delta U/I$	Примітки
1	+15,6	12,4	+1,26	
2	+8,4	12,4	+0,610	
3	-5,6	12,4	-0,427	

Оператор _____ Обчислювач _____
(підпис) (підпис)

Для контролю якості електрометричних досліджень виконуються контрольні вимірювання в обсязі 5% від загальної кількості вимірів. Допустима відносна похибка вимірювань не повинна перевищувати 5%. Спостереження з похибкою, що перевищує вказану, вважаються браком.

У полі безпосередньо після вимірів будується графік залежності градієнта потенціалу від положення точки виміру. Вертикальний масштаб на графіках вибирається залежно від інтенсивності вимірюваного поля. Зазвичай його доводиться приймати різним для різних профілів, оскільки величина градієнта потенціалу зменшується при віддаленні профілю від точки зарядки. В обох випадках у процесі вимірів обов'язково фіксують у польовому журналі знак вимірюваної різниці потенціалів.

Значення потенціалу ΔU і градієнта потенціалу ($\Delta U/MN$) нормують за силою струму I (при стабілізованій силі струму це не обов'язково). Результати польових робіт зазвичай зображають у вигляді карт потенціалу чи карт графіків потенціалу U/I і градієнта потенціалу $\Delta U/(MN \cdot I)$. Карты графіків зручні при кореляції результатів спостережень на сусідніх профілях і виділенні ознак поля, що характеризують положення зарядженого тіла. Зокрема жильні тіла чітко фіксуються точками переходу через нуль графіків градієнта потенціалу (рис. 4.34, в). Окрім графіків, на карту наносяться положення точки зарядки й проводів лінії живлення, геологічні дані, а також спрощена ситуація. Карта графіків є основним матеріалом для тлумачення результатів польових спостережень.

Завдання

1. Змонтувати установку для знімання градієнтів потенціалів над зарядженим тілом відповідно до схеми.

2. Виконати зйомку градієнтів потенціалів над зарядженим рудним тілом, якщо таке є в районі навчальної практики, або над моделлю добре провідного тіла. В обох випадках на ділянці робіт заздалегідь слід розбити мережу профілів відповідно до приведенних вище вказівок. Відстані між профілями, довжина профілів і крок вимірювальної установки вибираються відповідно до конкретних умов навчальної практики. За наявності моделі можна рекомендувати мережу $1 \times 1,5$ м при розмірах планшета 20×30 м.

Спостереження на профілях мають бути ув'язані ходом по периметру.

Для врахування впливу положення точки зарядки на отримані результати рекомендується знімання градієнтів виконувати двічі при різному положенні точки зарядки.

3. Обробити результати польових спостережень:

а) підрахувати похибки спостережень по замкнутому ходу і по поперечних профілях, розкидати їх і підрахувати потенціали точок мережі спостережень;

б) за отриманими в результаті польових спостережень і камеральної обробки даними побудувати карту графіків і карту ізоліній потенціалу та градієнта потенціалу для дослідженої площі.

4. Дати коротке геологічне тлумачення отриманих результатів.

Після закінчення роботи бригада представляє наступні звітні матеріали: 1) польовий журнал; 2) відомість обробки результатів спостережень; 3) графіки градієнтів потенціалу вздовж профілів; 4) карту графіків градієнта потенціалу; 5) карту ізоліній градієнта потенціалу над зарядженим тілом; 6) короткий опис отриманих результатів.

4.4.3. Гідрогеологічний варіант методу заряду

Цей варіант методу МЗТ застосовують для визначення напрямку й швидкості фільтрації підземних вод із використанням однієї свердловини. Для цього в свердловину, що виявила підземний потік, опускають на кабелі один електрод *A* живильної лінії й мішок із кухонною сіллю (рис. 4.38, а).

Інший електрод *B* відносять у "нескінченність". Після опускання електрода *A* пропускають струм і відслідковують ізолінію (див. п. 4.4.1). Ця ізолінія спочатку буде мати форму близьку до кола. Початковий радіус ізолінії береться рівним 1,5 – 2-кратній глибині до водоносного горизонту.

Під дією водного потоку розчин солі буде вимиватися зі свердловини й біля неї утвориться заряджена зона електроліту, витягнута в бік міграції підземних вод. Передня межа цієї зони буде рухатися зі швидкістю, приблизно рівною швидкості руху підземного потоку. Динаміку та напрямок руху цієї зони вивчають на поверхні землі шляхом знімання замкнутих екіпотенціальних ліній у різні проміжки часу (від одиниць до десятків годин).

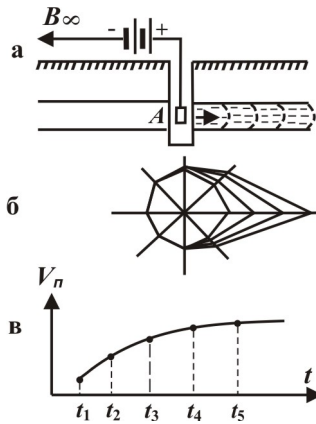


Рис. 4.38. Визначення швидкості фільтрації підземних вод методом заряду:

а – положення сольового ореолу в пласті; б – схема зміщення ізоліній;
в – графік залежності V від t

Еквіпотенціальні лінії витягуються в напрямку руху підземного потоку зі швидкістю $V = \Delta r / \Delta t$,

де Δr – зміщення ізоліній уздовж напрямку потоку, Δt – проміжок часу між зніманнями еквіпотенціальних ліній (рис. 4.38, б).

Будуючи графік залежності швидкості руху фронту ізоліній, можна визначити її сталі значення, яке й відповідає швидкості фільтрації підземного потоку (рис. 4.38, в).

5. МЕТОД ПРИРОДНОГО ЕЛЕКТРИЧНОГО ПОЛЯ

Метод природного електричного поля (ПП) належить до електрохімічних методів електрометрії й ґрунтується на вивченні природних електричних полів локального характеру. Походження цих полів пов'язане із фізико-хімічними процесами, в яких беруть участь геологічні утворення, а також із електрокінетичними явищами в багатофазних середовищах, якими є гірські породи. Однією з основних причин виникнення таких полів є фізико-хімічні процеси, пов'язані з окислювально-відновними реакціями, в яких бере участь рудне тіло, що відбуваються в зоні хімічного вивітрювання сульфідних родовищ. Природні електричні поля виникають також у зв'язку з фільтрацією підземних вод у пористих породах, а також наявністю дифузійно-адсорбційних процесів (див. п. 2.1.2).

Вимірювання й вивчення природних електричних полів фізико-хімічного походження широко застосовується при пошуках сульфідних родовищ. Спостереження за фільтраційними електричними полями дозволяє виявляти вихід джерел вод під наносами, вивчати характер фільтрації підземних вод при різних гідротехнічних дослідженнях і тому подібне.

5.1. Методика робіт

Природне поле вивчають шляхом вимірів його потенціалу або градієнта потенціалу на денній поверхні, у свердловинах і гірських виробках. Особливістю вимірювальних установок є те, що в них використовують неполярні електроди. При контакті звичайного металевого електрода із землею між ним і ґрунтом виникає контактна різниця потенціалів (електродний потенціал) внаслідок обміну іонами між металом електрода та солями, що знаходяться в ґрунтових розчинах. Величина електродного потенціалу залежить від металу електрода, поверхні контакту його з ґрунтом, вологості ґрунту, складу розчинів і тому різна в різних точках спостережень. Отже, величина вимірюваних

різниць потенціалів природного електричного поля при застосуванні звичайних металевих електродів створюється не тільки природним полем, а й за рахунок електродних потенціалів, які в різних точках спостережень різні.

У неполяризованих електродів контакт металевого електрода з ґрунтом здійснюється через насичений розчин солі того ж металу, з якого він зроблений. Завдяки цьому електродний потенціал залишається протягом вимірів практично постійним і близьким за значенням для обох електродів. Це дає можливість у процесі вимірів природного поля виключати похибку за рахунок електродних потенціалів.

Припустимо, що природні потенціали в точках 1 і 2 дорівнюють відповідно U_1 і U_2 й електродні потенціали електродів, розташованих у тих самих точках, – e_1 і e_2 . Тоді виміряна різниця потенціалів складає:

$$\Delta U_1 = U_M - U_N = (U_1 + e_1) - (U_2 + e_2) = (U_1 - U_2) + (e_1 - e_2) = \Delta U + E,$$

де $\Delta U = (U_1 - U_2)$ – шукана різниця потенціалів природного поля; $E = (e_1 - e_2)$ – різниця електродних потенціалів (власна поляризація електродів). Поміняємо електроди місцями. У цьому випадку виміряна різниця потенціалів буде:

$$\Delta U_2 = (U_1 + e_2) - (U_2 + e_1) = (U_1 - U_2) - (e_1 - e_2) = \Delta U - E.$$

Звідси:

$$\Delta U = \frac{(\Delta U_1 + \Delta U_2)}{2},$$

а власна поляризація електродів:

$$E = \frac{(\Delta U_1 - \Delta U_2)}{2}.$$

Таким чином, виміри, виконані з перестановкою електродів, дозволяють визначати істинне значення природної різниці потенціалів у землі, а також власну поляризацію електродів, яка завжди обчислюється за абсолютною величиною й звичайно не перевищує 1 – 2 мВ.

Загальні вимоги до неполяризованих електродів наступні: для польових досліджень методом ПП слід мати комплект не менше, ніж із чотирьох неполяризованих електродів. Щодня перед виходом у поле з комплекту підготовлених до роботи електродів вибирається пара з найменшим значенням поляризації. Для цього електроди встановлюють попарно в різних комбінаціях у вологу землю на відстані 2 – 3 см один від одного, під'єднують до клем M і N вимірювального приладу та вимірюють різницю потенціалів. Можна також здійснювати виміри, залишивши електроди в загальній посудині з мідним купоросом. З вимірних пар вибирається та, у якій власна поляризація не перевищує 1 – 2 мВ.

У процесі польових вимірів для заземлення електродів за допомогою саперної лопатки готуються ямки глибиною 5 – 8 см. Електрод ставиться в ямку так, щоб він торкався ґрунту тільки своєю пористою поверхнею. У кінці робочого дня електроди відмивають від налиплої землі, доливають мідний купорос і встановлюють у посудину з розчином.

Для польових вимірювань застосовують електророзвідувальну апаратуру типу ЭРП-1, ЭРА, АЭ-72 або інші прилади, що вимірюють різницю потенціалів.

Зйомка природного електричного поля переважно є площевою. Досліджувана площа покривається сіткою профілів, уздовж яких вимірюється електричне поле. Відстані між профілями й точками спостережень на них залежать від прогнозованих (очікуваних) розмірів, форми та глибини пошукових об'єктів і визначеного масштабу зйомки. Польові роботи включають два етапи: пошукова зйомка (масштаби 1:25 000, 1:10 000) та детальна зйомка природного поля (1:5 000, 1:2 000) у межах аномалій, зафіксованих при пошукових зйомках. Залежно від вимірюваних характеристик електричного поля розрізняють два способи виконання зйомок – спосіб *потенціалів* і спосіб *градієнтів потенціалів*. Основним є спосіб зйомки потенціалів. Другий спосіб – зйомки градієнтів, застосовується лише за наявності інтенсивних завад через блукаючі струми, коли вимір потенціалів ускладнений, а також при деталізаційних дослідженнях у межах аномальних зон.

5.1.1. Спосіб потенціалів

Суть способу полягає в тому, що потенціал усіх точок у межах досліджуваного профілю вимірюють щодо однієї точки, прийнятої за вихідну. За цю точку приймається або початкова точка профілю, або базисна, що розташована в центрі профілю (якщо профіль довгий).

Монтажна схема установки. Монтажна схема установки для роботи способом зйомки потенціалу показана на рис. 5.1, а. При роботі цим способом електрод N і прилад залишаються нерухомими на одній точці, а електрод M пересувається по профілю. Тому з'єднувальний провід 1 виготовляється коротким, а провід 2 намотується на нерухому котушку K_n і має довжину, достатню для того, щоб з однієї стоянки приладу виконати виміри потенціалу вздовж профілю. Котушка встановлюється на стійці біля приладу та з'єднується з ним коротким проводом 3.

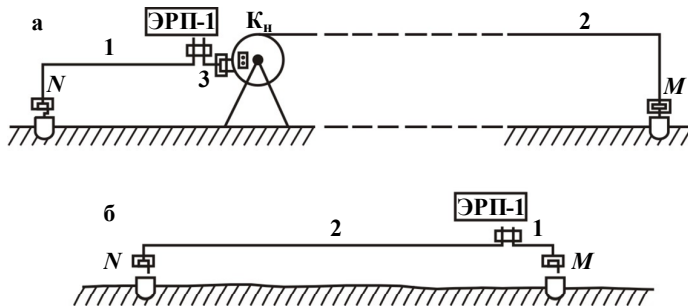


Рис. 5.1. Монтажні схеми установки для зйомки природного поля способом потенціалу (а) й способом градієнта потенціалу (б)

Полеві дослідження. Роботи на профілі проводяться в наступному порядку: електрод N встановлюють на нульовій точці першого профілю ($I/0$), поруч розташовують прилад і котушку з проводом. При вимірах на профілі електрод N вимірювальної лінії залишається постійно закріпленим на вихідній точці. Електрод M ставлять на точку $I/+1$. Виконують монтаж вимірювальної установки за схемою, приведеною на рис. 5.1, а.

Закінчивши зйомку першого профілю, рухомий електрод M встановлюють на нульову точку другого профілю $II/0$ і вимірюють її потенціал щодо початкової точки зйомки, зв'язуючи тим самим I і II профілі. Результат виміру записують в журнал зйомки другого профілю проти точки 0 . Потім установку переносять до точки $II/0$, заземляють на ній електрод N і в тому ж порядку проводять зйомку по профілю II . Аналогічно прив'язують третій профіль до другого й так далі.

Після закінчення зйомки всього планшета для ув'язки спостережень між собою на різних профілях вимірюють потенціали їх початкових точок щодо початкової точки одного із них, яка є базовою точкою для всього планшета зйомки.

Обробка й зображення результатів спостережень. Метою обробки спостережень є обчислення потенціалів усіх точок мережі щодо початкової точки зйомки (умовного нуля). Обробка починається з визначення середньої абсолютної похибки по ділянці зйомки. Для цього обчислюють різниці між основними й повторними вимірами, проведеними на кожній п'ятій точці профілю, що являють собою абсолютні похибки окремих вимірів. Середнє арифметичне абсолютних похибок окремих вимірів є середньою абсолютною похибкою. Вона не повинна перевищувати 5 мВ, при цьому абсолютні похибки на окремих точках не повинні більш ніж утричі перевищувати середню абсолютну похибку по ділянці. Значення абсолютних похибок (зі вказівкою номерів точок) і середнє значення похибки по ділянці записують у кінці журналу. Після цього для остаточної ув'язки профілів обчислюють середні значення різниць потенціалів між нульовими точками профілів за даними прямого й зворотного ув'язувальних ходів. Ці середні значення записують у польові журнали в другу графу проти точки 0 відповідних профілів. Різниця з раніше виміряними при переході з профілю на профіль значеннями не повинна перевищувати триразової величини середньої абсолютної похибки.

Потім обчислюють потенціали точок спостережень на кожному профілі й записують їх у графу 4 журналів. Для першого профілю переносять значення потенціалів з графи 2 в графу 4, оскільки нульова точка першого профілю є

загальним нулем для всього планшета. Для інших профілів значення потенціалів точок, виміряні щодо нульової точки цього профілю і записані в графі 2 відповідних журналів, алгебраїчно збільшують на величину різниці потенціалів між нульовими точками даного та попереднього профілів (за даними ув'язувального ходу).

Журнали підписуються оператором й обчислювачем. Обчислення перевіряються третьою особою й підписуються нею та начальником геофізичного загону.

За результатами обробки польових спостережень будують графіки потенціалу природного поля, карти екіпотенціальних ліній і карти графіків потенціалу природного поля (див. дод. Б).

Завдання

1. Підготувати ділянку зйомки (на вибраній за вказівкою викладача ділянці розбити мережу спостережень).

2. Підготувати установку для зйомки природного поля, керуючись монтажною схемою, зображеною на рис. 5.1, а. Для цього необхідно:

а) підготувати комплект неполярних електродів. Взяти не менше чотирьох неполярних електродів, ретельно вимити їх теплою дистильованою водою та залишити в ній на деякий час. Мідні стрижні електродів зачистити тонкою шкіркою, відполірувати й промити в азотній кислоті. У скляній або фаянсовій посудині приготувати 2 л насиченого розчину хімічно чистого мідного купоросу (на 2 л води $500 \text{ г } \text{CuSO}_4 \cdot 5\text{H}_2\text{O}$). Налити приготовлений розчин у чашки електродів, наповнивши їх майже доверху, покласти в кожну декілька кристалів купоросу та вставити пробки з мідними електродами. Такий же розчин налити в плоску кювету (неметалеву), поставити в неї електроди й з'єднати їх проводами;

б) підготувати проводи вимірювальної лінії. Відповідно до рис. 5.1, а для провідників 1 і 3 відміряти два відрізки м'якого проводу завдовжки 1,5 – 2 м кожний. Одні кінці цих відрізків приєднати окремо до контактних штирів польової вилки для приєднання до гнізд *M* і *N* приладу, на інші надіти вилки з контактними штирями. Відміряти відрізок проводу ГПСМПО або ПСРП завдовжки 500 м. Один кінець його приєднати до

панелі електророзвідувальної котушки, а на інший надіти вилку зі штирем. Провід намотати на котушку. При намотуванні провід ретельно оглянути, виявлені ушкодження ізоляції усунути, а після намотування "продзвонити".

3. Провести зйомку природного поля на підготовленій ділянці.

4. Виконати обробку результатів спостережень і розрахувати потенціали точок.

5. Графічно зобразити результати зйомки природного поля – побудувати карту ізоліній і карту графіків потенціалу.

6. Після закінчення роботи бригада надає наступні звітні матеріали; 1) польові журнали; 2) карту ізоліній і карту графіків потенціалу природного поля; 3) коротке геологічне тлумачення результатів зйомки.

5.1.2. Спосіб градієнтів потенціалу

Особливістю способу є те, що в процесі польових робіт, рухаючись уздовж профілю, вимірюють різницю потенціалів між двома сусідніми точками. За вимірними різницями потенціалів підраховують потенціали всіх точок досліджуваної площі відносно однієї базисної.

Монтажна схема установки. Монтажна схема установки для роботи способом градієнта потенціалу показана на рис. 5.1, б. Вимірювальний прилад встановлюється біля одного з електродів, а клема M приладу з'єднується з ближнім електродом коротким проводом 1 завдовжки 1,5 – 2 м. Другий електрод з'єднується з клемою N проводом 2 , довжина якого визначається відстанню між точками на профілях (кроком спостережень). У процесі роботи вся установка переміщується по профілю. Зважаючи на невеликі розміри установки, для з'єднувальних проводів можна застосовувати легкі м'які проводи без сталевих жил.

Польові дослідження. Польові спостереження способом градієнта проводять по замкнених контурах або ходах, прив'язаних до точок із відомими потенціалами. Спочатку виміри проводять по замкнутому полігону, утвореному двома крайніми профілями. Потім спостереження виконують на кожному наступному профілі,

прив'язуючи виміри по ньому до кінцевих точок попереднього профілю. Це дає можливість оцінити та врахувати при обробці похибки спостережень. Замкнені ходи зручно утворювати із двох сусідніх профілів або їх половин.

Виміри ведуться в наступному порядку (рис. 5.2, а): вимірвальний прилад встановлюють біля точки $I/+1$ (перша точка першого профілю), електроди ставляться на точки $I/0$ і $I/+1$. Задній електрод N (на точці $I/0$) за допомогою довгого проводу приєднують до клем N приладу, а передній (на точці $I/+1$) – коротким проводом до клем M . Виміряну між цими точками різницю потенціалів обчислювач записує в польовий журнал, після чого працівник за командою оператора переносить задній електрод через два інтервали (із точки $I/0$ на точку $I/+2$). При такому порядку перестановки електродів їх поляризація буде у вимірах із різним знаком і при підсумовуванні вимірів по контуру для обчислення потенціалів похибка за рахунок власної поляризації електродів не накопичується.

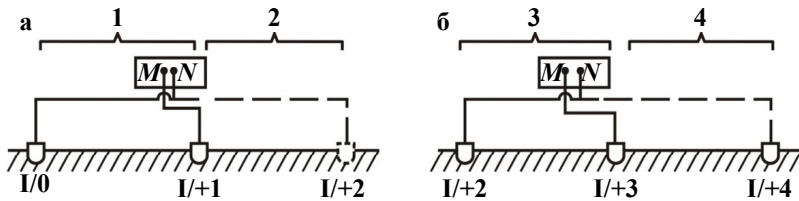


Рис. 5.2. Послідовність вимірювань при зйомці способом градієнта:
стоянки: а – перша, б – друга; 1–4 – перший-четвертий виміри

При перестановці електродів на наступний інтервал вимірвальний прилад раціонально залишати на колишній стоянці, а довгий провід перетягти вперед до переднього електрода на точці $I/+2$. При цьому передній електрод виявляється приєднаним до клем N , а задній – до клем M . Щоб не витратити часу на перемикання провідників, проводять виміри різниці потенціалів у цьому положенні, а знак різниці міняють на зворотний. Загальний порядок виконання вимірів на першій стоянці показаний на рис. 5.2, а.

Після вимірів на першій стоянці прилад переносять через два інтервали на другу стоянку в точку I/+3. На цій стоянці вимірюють різниці потенціалів між точками I/+2 і I/+3, а потім між I/+3 і I/+4 (рис. 5.2, б). Знову переносять прилад через два інтервали на точку I/+5 і т. д. При цьому уважно стежать за знаком вимірюваних різниць потенціалів: коли довгий провід виявляється попереду, знак міняють на зворотний.

Для оцінки величини власної поляризації електродів на кожній п'ятій чи десятій точці профілю виконують двократні виміри різниці потенціалів із перестановкою електродів між вимірами. Середнє значення суми відліків відповідає різниці потенціалів природного поля між точками профілю, а середнє значення їх різниці – різниці потенціалів власної поляризації електродів. У тому випадку, коли необхідна високоточна зйомка природного поля, виміри з перестановкою електродів необхідно виконувати в усіх точках профілю.

Результати вимірів записуються в журналі, форма якого наведена нижче. У ході польових спостережень заповнюються тільки графи 1, 2, 3, 7, а інші – при обробці спостережень. У графу 3 записується значення власної поляризації електродів, розраховане за результатами вимірів із перестановкою електродів на відповідних інтервалах.

Якщо поляризація електродів почне систематично рости й перевищить 2 мВ, треба промити електроди дистильованою водою й залити свіжим розчином мідного купоросу.

Дійшовши до кінця першого профілю, вимірюють різницю потенціалів між крайніми точками профілів I і II. Якщо при цьому відстань між профілями буде більшою від довжини вимірювальної лінії, намічають одну або декілька проміжних точок, які на план не наносяться, а використовуються тільки для зв'язку результатів спостережень між профілями. Вимірявши різниці потенціалів між проміжними точками і кінцевою точкою профілю II, проходять цей профіль від кінцевої точки до початкової й точку II/0 тим же способом прив'язують до початкової точки вимірів I/0. При цьому отримують замкнений хід.

Запис спостережень ведеться в журналі, форма якого наведена нижче.

Ділянка – "Петровська". Дата – 25.05.2010. Ясно, сухо.
Профіль – III. Початок спостережень – 8 год 15 хв.
Крок спостережень – 20 м. Кінець спостережень – 10 год 50 хв.
Оператор – Савчук Т. Г. Обчислювач – Айзерман С. Г.

№ точки	ΔU , мВ	E , мВ	ε	$\Delta U_{\text{випр}}$, мВ	U , мВ	Примітки
1.	+7,6	0,9	-0,2	+7,4	100,0	$\Delta U_1 = 8,5$
2.	+5,1	-	-0,2	+4,9	107,4	$\Delta U_2 = 6,7$
3.	+2,3	-	-0,2	+2,1	112,3	
4.	-1,4	-	-0,2	-1,6	114,4	
					112,8	

$$\Sigma(+\Delta U) = +174,3; \Sigma(-\Delta U) = 161,3; m = +13,0; p = 3,9 \%$$

Оператор _____ Обчислювач _____
 (підпис) (підпис)

До відпрацьованого таким чином опорного полігону прив'язують спостереження по інших профілях. Початкову й кінцеву точки кожного профілю прив'язують до кінцевих точок попереднього.

Обробка результатів спостережень. Обробка результатів спостережень при роботі способом зйомки градієнтів починається із замкненого контуру, утвореного першим і другим півпрофілями. Передусім підраховують суми позитивних і негативних різниць потенціалів ΔU , обчислюють нев'язку $m = \Sigma(+\Delta U) + \Sigma(-\Delta U)$ й записують її в кінці журналу спостережень.

Відносна похибка визначається як відношення абсолютного значення нев'язки m до суми абсолютних значень спостережених різниць потенціалів, виражене у відсотках:

$$p = \frac{|m| \cdot 100}{\Sigma|\Delta U|}.$$

Спостереження вважаються задовільними, якщо p не перевищує 5%. Інакше спостереження мають бути проведені повторно. Значення p записується в польовий журнал.

Допустима нев'язка розкидається рівними долями з оберненим знаком по всіх вимірних різницях потенціалів ΔU . Поправка за нев'язку розраховується з округлюванням до першого десяткового знака за формулою:

$$\varepsilon = -m/n,$$

де n – число вимірів у контурі.

Невеликі за абсолютним значенням нев'язки можна розкидати тільки по найбільших величинах ΔU . Поправки записуються в польовий журнал у графу 4. Потім у графу 5 журналів записуються виправлені через нев'язку покази різниці потенціалів. Після цього обчислюють потенціали всіх точок контура щодо потенціалу початкової точки $I/0$. Її потенціал зазвичай вибирається таким, щоб потенціали всіх інших точок були позитивними. Потенціал наступної точки дорівнює сумі потенціалу попередньої з виправленою різницею потенціалів між цими точками. Значення потенціалів заносять в передостанню 6 графу журналу.

Обробка спостережень по наступному ходу (профілю) проводиться за тією ж схемою. Проте нев'язка обчислюється за іншою формулою:

$$m = [\Sigma(+\Delta U) + \Sigma(-\Delta U) + (U_{II} - U_K)],$$

де U_{II} – потенціал початкової точки ходу; U_K – потенціал кінцевої точки ходу. Ці потенціали вже відомі із спостережень за попереднім профілем. У квадратних дужках вищенаведеної формули перший доданок відповідає сумі позитивних, а другий – сумі негативних значень різниць потенціалів уздовж цього профілю.

Визначивши відносну похибку тим же способом, що й при обробці спостережень по замкнутому контуру, і розкидавши нев'язку, обчислюють потенціали точок профілю, виходячи зі значень потенціалів U_{II} й U_K . При обробці спостережень враховують і різниці потенціалів між проміжними точками.

Журнали підписуються оператором та обчислювачем, перевіряються третьою особою, підписуються перевіряючим і начальником геофізичного загону.

Результати спостережень способом градієнтів зображаються й оформляються так само, як і при зйомці потенціалів (див. додаток Б).

Основними графічними матеріалами, що подаються за результатами польових робіт, є карти ізоліній, карти графіків та окремі графіки потенціалу природного електричного поля. Перетин потенціальних ліній на картах залежить від інтенсивності спостережуваного поля. Зазвичай він вибирається кратним 5, 10, 25 і 50 мВ.

Із двох розглянутих способів зйомки природного поля спосіб потенціалів є більш продуктивним, а тому він застосовується при площових пошукових зйомках. Спосіб градієнтів є менш точним і може бути рекомендованим для детальних робіт лише на обмежених площах. У той же час у районах із високим рівнем промислових завод перевагу потрібно надати способу градієнтів потенціалу.

Завдання

1. Підготувати ділянку зйомки (на вибраній за вказівкою викладача ділянці розбити мережу спостережень).

2. Підготувати установку для зйомки природного поля. Для цього необхідно: а) підготувати комплект неполяризованих електродів так само, як і для роботи способом потенціалів (див. вище); б) підготувати проводи вимірювальної лінії. З м'якого проводу згідно з рис. 5.1, б відміряти два відрізки – один для провідника 2 завдовжки на 1 м більший вибраного для зйомки кроку вимірів, інший – для провідника 1 завдовжки 2 м. Кінці цих провідників приєднати окремо до штирів польової вилки, яка слугує для з'єднання їх із гніздами *MN* приладу, на інші кінці надіти польові вилки зі штирями.

3. Провести зйомку природного поля способом градієнта потенціалу на підготовленій для досліджень ділянці.

4. Обробити результати спостережень і розрахувати потенціали точок.

5. Графічно зобразити результати зйомки – побудувати карту екіпотенціальних ліній і карту графіків потенціалу.

6. Дати геологічне тлумачення результатів зйомки.

Після закінчення роботи бригада представляє наступні звітні матеріали: 1) польові журнали; 2) карту ізоліній і карту графіків потенціалу; 3) короткий опис отриманих матеріалів і результати їх інтерпретації.

5.2. Інтерпретація експериментальних даних

Інтерпретація результатів зйомки природного електричного поля може бути якісною і кількісною.

5.2.1. Якісна інтерпретація

Загальну схему якісної інтерпретації результатів спостережень при пошукових і картувальних роботах можна окреслити наступним чином: на карті виділяються аномальні зони з інтенсивністю, що явно перевищує похибку спостережень, і коливання поля нормального фону. Нижня межа аномальних зон при цьому може бути оцінена в $-20 - -30$ мВ. У межах аномальних зон виділяються й простежуються від профілю до профілю окремі аномалії. Установлюється положення та протяжність аномалій, природу яких пояснюють, виходячи із загальної геологічної ситуації. Якщо роботи виконуються в рудних районах, то, як правило, такі аномалії спричинені поляризованими рудним об'єктами і є негативними. Морфологія аномалій дозволяє наближено виділити форму рудного об'єкта і його просторову орієнтацію. Так ізометричні чи витягнуті щодо аномалії відповідають аналогічним за формою рудним об'єктам. Якщо на карті графіків природного поля фіксується чітка кореляція аномалій на сусідніх профілях, у результаті чого утворюється витягнута кореляційна зона, це може свідчити про наявність поляризованого пласта (наприклад, графіту чи сульфідного зруденіння).

У районах розвитку фільтраційних процесів негативними аномаліями природного поля фіксуються області притоку води, а позитивними – області її розвантаження. Амплітудно-морфологічними характеристиками просторового розподілу природного поля можуть картуватися різні за літологією гірські утворення – пісок, суглинок, глина і т. ін.

При встановленні положення й протяжності аномалій враховуються як геоморфологічні та гідрогеологічні умови, які впливають на інтенсивність аномалій і можуть бути причиною розриву аномальних зон, так і результати спостережень іншими методами й перш за все методами електропрофілювання.

За видом кривих в аномальних областях виявляється характер об'єкта (окреме тіло чи комплекс) й орієнтовно визначається глибина провідників. Прості прийоми з використанням парамет-

рів q і m (розглядаються нижче) дають можливість оцінити порядок глибин уже в процесі самих спостережень. Це, поряд з інтенсивністю і конфігурацією аномалій, дозволяє безпосередньо в полі виділяти аномалії різної природи, якщо можливі об'єкти чи джерела поля мають відчутно різну глибину залягання чи розміри. Для більш точної характеристики об'єкта та кількісної оцінки його елементів залягання повинні бути зняті інтерпретаційні профілі, які, зазвичай, задаються в центральній частині аномалії й знімаються з більшою точністю та детальністю.

5.2.2. Кількісна інтерпретація аномалій природного поля

Кількісна інтерпретація виконується, як правило, у районах розповсюдження рудних об'єктів для наближеної оцінки їх параметрів. При цьому самі поляризовані рудні тіла апроксимуються тілами правильної геометричної форми – кулею, циліндром, пластом. Для таких поляризованих об'єктів отримані аналітичні розв'язки прямих задач, які дозволяють виконувати кількісну інтерпретацію аномалій, спричинених як вертикально, так і похило поляризованими рудними тілами.

Інтерпретація аномалій природних полів вертикально поляризованих ізометричних та витягнутих циліндричних тіл. Тіло ізометричної форми можна апроксимувати кулею. Потенціал U електричного поля вертикально поляризованої кулі радіуса R_0 із центром, розташованим на глибині h від поверхні землі, подається як потенціал поля електричного диполя, що знаходиться в центрі кулі й має момент M , орієнтований вздовж осі поляризації*:

$$U = M \cdot \frac{h}{(x^2 + y^2 + h^2)^{3/2}},$$

де x , y – координати точок спостережень на поверхні землі в системі координат, початок якої суміщений з епіцентром кулі.

*Примітка: Вісь поляризації – лінія, що з'єднує дві точки з максимальними протиполярними стрибками потенціалу на контактній поверхні, при вертикальній поляризації вона вертикальна.

Момент M ефективного електричного диполя, присутній у приведеній формулі, має вигляд:

$$M = 2\Delta U_0 R_0^2 \frac{\rho_e}{\rho_e + 2\rho_i},$$

де ΔU_0 – максимальний стрибок потенціалу на контактній поверхні рудного об'єкта з уміщувальним середовищем (у точках контактної поверхні, що знаходиться ближче до денної поверхні, має від'ємне значення); ρ_e і ρ_i – питомі опори вміщувального середовища й рудного покладу. Графік потенціалу природного поля вертикально поляризованого покладу симетричний щодо епіцентра кулі (рис. 5.3).

Поле вертикально поляризованого, досить витягнутого в горизонтальному напрямку (двовимірного) рудного тіла можна подати як поле вертикально поляризованого нескінченно витягнутого циліндра з радіусом r_0 , вісь якого знаходиться на глибині h від поверхні землі. Аналітично це поле виражається як поле плоского лінійного диполя, що має момент M_1 , зорієнтований вертикально. Для точок ортогонального щодо простягання тіла профілю x , що перетинає проекцію осі циліндра на денну поверхню в початку координат, потенціал поля у випадку вертикальної поляризації дорівнює:

$$U = M_1 \cdot \frac{h}{x^2 + h^2},$$

де момент ефективного плоского диполя M_1 має вигляд:

$$M_1 = 2\Delta U_0 r_0 \frac{\rho_e}{\rho_e + \rho_i}.$$

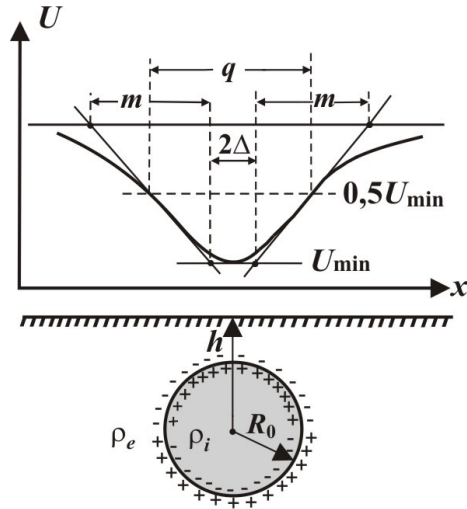


Рис. 5.3. Інтерпретація аномалій природного поля способом параметрів m і q

Аналіз приведених співвідношень для потенціалів полів вертикально поляризованих об'єктів свідчить, що глибина h до центра кулі та осі циліндра досить просто може бути визначена за шириною аномалії q на амплітудному рівні $0,5U_{\min}$ (рис.5.3):

- а) для кулі – $h \approx 0,65q$;
- б) для циліндра – $h = 0,5q$.

Глибину h можна визначити також за параметром m , що характеризує нахил дотичної до графіка потенціалу в точці перегину (рис. 5.3):

- а) для кулі – $h \approx 0,86m$;
- б) для циліндра – $h \approx 0,65m$.

Параметр m визначається графічно за спостереженою кривою потенціалу способом, зображеним на рисунку. Його значення дорівнює відстані між точками перетину нахиленої дотичної з нульовою лінією та дотичною до мінімуму. Зазвичай визначають два значення параметра m – m_1 та m_2 по лівій та правій дотичних і два значення глибин h_1 і h_2 відповідно. За глибину h приймається їх середнє арифметичне значення.

Для оцінки розмірів рудних об'єктів спочатку визначаються моменти ефективних електричних диполів M та M_1 по максимальній амплітуді аномалії над поляризованими покладами $|U_{\min}|$ та з урахуванням визначених глибин h :

$$M = |U_{\min}|h^2; \quad M_1 = |U_{\min}|h.$$

У подальшому, при відомих значеннях питомих опорів уміщувального середовища ρ_e і самого покладу ρ_i , а також максимального стрибка потенціалу ΔU_0 , радіуси кулі R_0 та циліндра r_0 визначаються згідно з формулами:

$$R_0 = \sqrt{\frac{\rho_e + 2\rho_i}{\rho_e} \cdot \frac{M}{2\Delta U_0}} \quad \text{або} \quad R_0 = \sqrt{\frac{\rho_e + 2\rho_i}{\rho_e} \left| \frac{U_{\min}}{2\Delta U_0} \right|} \cdot h;$$

$$r_0 = \frac{\rho_e + \rho_i}{\rho_e} \cdot \frac{M_1}{|2\Delta U_0|} \quad \text{або} \quad r_0 = \frac{\rho_e + \rho_i}{\rho_e} \cdot \left| \frac{U_{\min}}{2\Delta U_0} \right| h.$$

Максимальний стрибок потенціалу на контактних поверхнях оцінюється за результатами вимірів природного поля у свердловині чи на відслоненнях, де чітко видно контакт рудного об'єкта з уміщувальним середовищем. Зазвичай він складає 500–600 мВ. Якщо поклад є рудним, тобто $\rho_e \gg \rho_i$, то радіуси кулі та циліндра визначаються згідно з формулами:

$$R_0 = \sqrt{\frac{M}{2\Delta U_0}} = \sqrt{\left| \frac{U_{\min}}{2\Delta U_0} \right|} \cdot h; \quad r_0 = \frac{M_1}{|2\Delta U_0|} = \left| \frac{U_{\min}}{2\Delta U_0} \right| h.$$

Інтерпретація аномалій, спричинених похило поляризованими тілами ізометричної та циліндричної форм. Над похило поляризованими кулею та циліндром аномалії природного поля подаються у вигляді:

$$U = M \cdot \frac{x \cos \alpha - h \sin \alpha}{(x^2 + y^2 + h^2)^{3/2}},$$

$$U = M_1 \cdot \frac{x \cos \alpha - h \sin \alpha}{x^2 + h^2},$$

де: M і M_1 – моменти ефективних електричного та плоского електричного диполів (див. розглянутий вище випадок вертика-

льної поляризації), α – кут нахилу осі поляризації (для кулі) чи площини поляризації (для циліндра) щодо денної поверхні (рис. 5.5). Наведені аналітичні співвідношення показують, що аномалія ПП являє собою сукупність двох суміжних аномалій різної полярності (рис. 5.4).

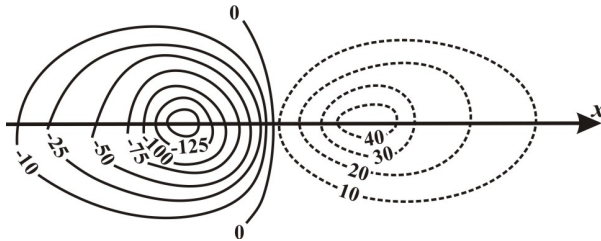


Рис. 5.4. Аномалія природного поля над похило поляризованим покладом

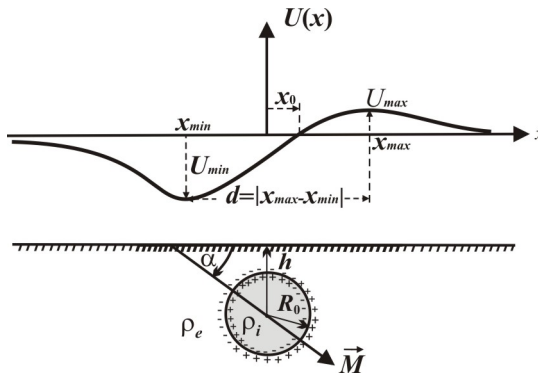


Рис. 5.5. Інтерпретації аномалій природного поля, спричинених похило поляризованими покладами

Аналіз приведених формул дозволяє сформулювати наступну методику кількісної інтерпретації таких аномалій, яка ґрунтується на використанні їх характерних (екстремальних) точок [15].

1. Із карти розподілу потенціалу природного поля вибирається аномалія, що підлягає інтерпретації. Через центри суміжних різнополярних екстремумів вибраної аномалії (рис. 5.4) проводиться інтерпретаційний профіль, уздовж якого виконують цифрування аномалії ПП і будують її графік (рис.5.5). Більш точно графік розподілу потенціалів уздовж інтерпретаційного профілю отримують шляхом його детальної зйомки.

2. Інтерпретація починається з визначення кута нахилу α осі поляризації рудного тіла. Для ізометричних тіл користуються спеціальною номограмою, яка попередньо розраховується за формулою:

$$F(\alpha) = \frac{3\sqrt{\operatorname{tg}^2\alpha + \frac{8}{9}} + \operatorname{tg}\alpha}{3\sqrt{\operatorname{tg}^2\alpha + \frac{8}{9}} - \operatorname{tg}\alpha} \cdot \left(\frac{9\left(\sqrt{\operatorname{tg}^2\alpha + \frac{8}{9}} + \operatorname{tg}\alpha\right)^2 + 16}{9\left(\sqrt{\operatorname{tg}^2\alpha + \frac{8}{9}} - \operatorname{tg}\alpha\right)^2 + 16} \right)^{3/2}$$

і має вигляд, наведений на рис. 5.6.

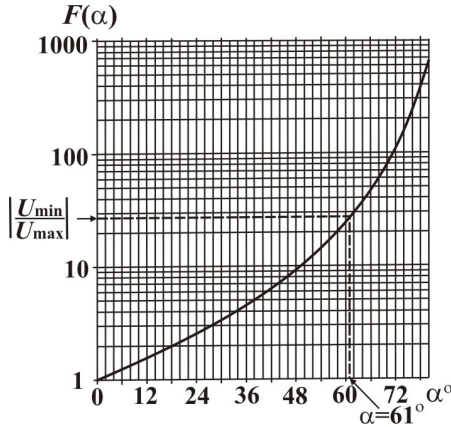


Рис. 5.6. Номограма для визначення кута нахилу осі поляризації ізометричних тіл

За графіком аномалії природного поля, побудованого вздовж інтерпретаційного профілю (рис. 5.5), визначаються мінімальне U_{\min} та максимальне U_{\max} значення поля й береться модуль їх відношення $|U_{\min}/U_{\max}|$. Кут нахилу α осі поляризації рудного тіла визначається за отриманим числовим значенням цього відношення з використанням розрахованої та побудованої номограми $F(\alpha)$ (рис. 5.6). При використанні в процесі інтерпретації комп'ютерної техніки кут α може бути визначений шляхом числового розв'язку трансцендентного рівняння: $F(\alpha) - |U_{\min}/U_{\max}| = 0$, де $F(\alpha)$ – приведений вище аналітичний вираз.

Кут нахилу осі поляризації у випадку тіл витягнутої циліндричної форми визначається аналітично:

$$\alpha = \arcsin \left(\frac{|U_{\min}/U_{\max}| - 1}{|U_{\min}/U_{\max}| + 1} \right).$$

3. Глибина h до центра поляризованої кулі та до осі циліндричного тіла визначається за відстанню d між точками максимуму та мінімуму аномального графіка ($d = |x_{\min} - x_{\max}|$) і визначеним кутом α згідно зі співвідношеннями:

а) глибина до центра кулі –
$$h = \frac{2d}{\sqrt{8 + 9\text{tg}^2\alpha}};$$

б) глибина до осі циліндра –
$$h = 0,5d \cdot \sin\alpha.$$

4. За відомими значеннями h та α визначається зміщення x_0 точки переходу через нуль аномального графіка щодо епіцентра поляризованої кулі (у випадку циліндра – щодо точки перетину профілем проекції осі циліндра на денну поверхню):

$$x_0 = h \cdot \text{tg}\alpha.$$

Епіцентр кулі та точка перетину профілем проекції осі циліндра на денну поверхню зміщені на значення x_0 від точки переходу графіка аномалії через нуль у бік більш амплітудного від'ємного екстремуму (рис. 5.5).

5. Для визначення розмірів поляризованих тіл (радіусів кулі R_0 та циліндра r_0) необхідно визначити моменти ефективних диполів M та M_1 . За амплітудами екстремумів $|U_{\min}|$ і $|U_{\max}|$ та за відомими значеннями h і α моменти ефективних диполів M і M_1 розраховують за наступними формулами:

$$M = |U_{\min}| h^2 \cdot \frac{\left[9 \left(\sqrt{\text{tg}^2\alpha + \frac{8}{9}} - \text{tg}\alpha \right)^2 + 16 \right]^{3/2}}{16 \cos\alpha \left(3 \sqrt{\text{tg}^2\alpha + \frac{8}{9}} + \text{tg}\alpha \right)}$$

$$\text{або } M = U_{\max} h^2 \cdot \frac{\left[9 \left(\sqrt{\text{tg}^2 \alpha + \frac{8}{9}} + \text{tg} \alpha \right)^2 + 16 \right]^{\frac{3}{2}}}{16 \cos \alpha \left(3 \sqrt{\text{tg}^2 \alpha + \frac{8}{9}} - \text{tg} \alpha \right)};$$

$$M_1 = |U_{\min}| \cdot \frac{2h}{1 + \sin \alpha} \quad \text{або} \quad M_1 = U_{\max} \cdot \frac{2h}{1 - \sin \alpha}.$$

Розрахунок моментів ефективних диполів краще реалізувати, використовуючи $|U_{\min}|$, оскільки мінімум має більшу амплітуду.

Моменти ефективних диполів можна оцінити й за наступними формулами:

$$M = \frac{|U_{\min}|}{\cos \alpha} \cdot \frac{(x_{\min}^2 + h^2)^{\frac{3}{2}}}{|x_{\min} - h \cdot \text{tg} \alpha|} \quad \text{або} \quad M = \frac{U_{\max}}{\cos \alpha} \cdot \frac{(x_{\max}^2 + h^2)^{\frac{3}{2}}}{|x_{\max} - h \cdot \text{tg} \alpha|};$$

$$M_1 = \frac{|U_{\min}|}{\cos \alpha} \cdot \frac{x_{\min}^2 + h^2}{|x_{\min} - h \cdot \text{tg} \alpha|} \quad \text{або} \quad M_1 = \frac{U_{\max}}{\cos \alpha} \cdot \frac{x_{\max}^2 + h^2}{|x_{\max} - h \cdot \text{tg} \alpha|},$$

в яких x_{\min} та x_{\max} – відстані від визначеного нами положення епіцентра кулі (у випадку циліндра від визначеної точки перетину профілем проекції осі циліндра на денну поверхню) до відповідних екстремумів аномального графіка.

Після визначення моментів ефективних диполів радіуси кулі та циліндра визначаються так само, як і для випадку вертикальної поляризації рудних об'єктів.

Інтерпретація аномалій природного поля для вертикального стовпчастого покладу. Стовпчастий рудний поклад подамо як поляризовану систему, верхня частина якої є катодною, а інша частина – анодною областю (рис. 5.7).

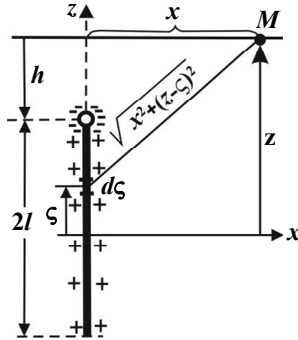


Рис. 5.7. Схема для розрахунку поля вертикально поляризованого стовпчастого покладу

Потенціал електричного поля, що створюється такою системою, наближено може бути розрахований шляхом заміни верхньої частини рудного тіла негативним точковим, а нижній – рівним йому за величиною лінійним позитивним джерелом. Тоді сумарний потенціал поля на денній поверхні буде:

$$U = U_+ + U_- = \frac{I\rho}{2\pi} \left[\frac{1}{2l} \ln \frac{z+l + \sqrt{x^2 + (z+l)^2}}{z-l + \sqrt{x^2 + (z-l)^2}} - \frac{1}{\sqrt{x^2 + (z-l)^2}} \right],$$

де: I – струм, що проходить через точкове та лінійне джерела; x – відстань точки спостереження щодо епіцентра точкового джерела; l – половина довжини стовпчастого рудного об'єкта; z – глибина до центра покладу.

Розрахунки аномальних графіків потенціалу і їх аналіз свідчать, що в межах глибин h до верхньої кромки (верхнього полюсу) покладу, виражених у довжинах провідника $h/2l = 0,3 \div 1,1$ ця глибина може бути визначена за наближеним виразом:

$$h = (0,4 \div 0,5) q,$$

де q – ширина аномалії на половинному рівні.

За умови, що $2l \gg h$, отримуємо криву потенціалу поля негативного точкового джерела, глибина h до якого буде:

$$h = 0,29q \approx 0,3q.$$

Поклавши $2l \ll h$, отримуємо поле електричного диполя, аналогічне полю рівномірно поляризованої кулі, а отже глибина до такого дипольного джерела:

$$h \approx 0,65q.$$

Таким чином, поле стовпчастого покладу дає зміну коефіцієнта перед q від 0,3 до 0,65. Відносно невеликі коливання коефіцієнта дозволяють методом параметра q оцінити порядок глибини до верхнього полюса. У тому випадку, коли порядок протяжності провідника на глибину відомий із геологічних даних, межі можливої зміни коефіцієнта звужуються й точність визначення глибин підвищується. При цьому необхідно мати на увазі, що визначена глибина верхнього полюса буде щодо точки, що знаходиться в рудному тілі.

Глибина до верхнього полюса може бути визначена також способом параметра m . Розрахунки кривих потенціалу в межах відносних глибин $h/2l = 0,3 - 1,1$ та їх аналіз свідчать, що в цьому глибинному інтервалі для визначення h можна застосувати наближену формулу:

$$h \approx (0,46 - 0,58)m.$$

Коефіцієнт 0,46 застосовується для випадку, коли протяжність провідника приблизно втричі переверщує глибину h , і 0,58, коли вони приблизно однакові. Отже для відміченого глибинного інтервалу оцінка глибини до верхньої кромки може виконуватися за формулою:

$$h \approx 0,5m.$$

Для граничних випадків глибина оцінюється наступним чином:

$$\begin{aligned} h &\approx 0,38m, & \text{при } 2l \gg h; \\ h &\approx 0,86m, & \text{при } 2l \ll h. \end{aligned}$$

Глибину до верхнього полюса покладу й протяжність провідника на глибину зручніше за все й точніше визначати за допомогою логарифмічної палетки, що являє собою залежність відносних значень потенціалу $U(x)/U_{x=0}$ від відносних відстаней до центра аномалії x/h , побудовану в логарифмічному масштабі для різних відносних протяжностей провідника на глибину $2l/h$. Вигляд такої палетки показаний на рис. 5.8.

Для визначення глибини до верхнього полюса покладу побудована на прозорому логарифмічному бланку експериментальна крива $U(x)/U_{x=0} = f(x)$ розташовується зверху логарифмічної палетки та шляхом переміщення суміщується з однією із теоретичних. Відмічена на прозорому бланку абсциса лінії h палетки відповідає глибині до верхнього полюса покладу, а модуль $2l/h$ кривої палетки (шифр кривої), що збіглася з експериментальною, при відомому значенні h дозволяє оцінити протяжність тіла на глибину $2l$.

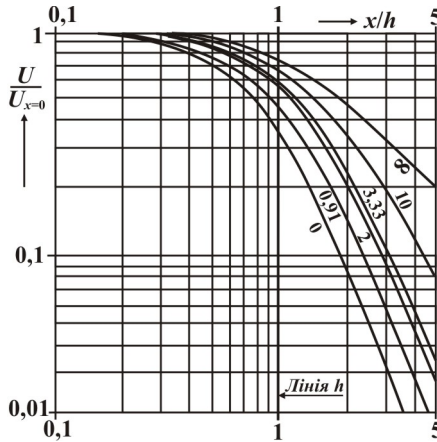


Рис. 5.8. Вид палетки потенціалу для вертикально поляризованого стовпчастого покладу:
(числа біля кривих відповідають значенням $2l/h$)

Поле для стовпчастого покладу симетричне. Однак така симетрія характерна й для тіл, що мають значну горизонтальну потужність. Помітне перевищення глибин h , визначених способом параметра q і за допомогою палетки, у порівнянні з глибинами, визначеними способом параметра m , є свідченням значної горизонтальної потужності провідника. Оцінити наявність значної потужності тіла можна також за довжиною відрізка 2Δ дотичної до мінімуму, що відтинається боковими дотичними (рис. 5.3). Якщо $n = 2\Delta/(2m+2\Delta)$ помітно більше 0,1, то це ознака значної горизонтальної потужності тіла.

Інтерпретація аномалій природного поля для вертикального плаstopодібного покладу. Поле плаstopодібного покладу прямокутної форми, поляризованого за падінням, може бути в грубому наближенні подане як поле системи двох заземлень – лінійного, розташованого в голові пласта й зарядженого негативно, і пластинчатого, розташованого в площині пласта та зарядженого позитивно (рис.5.9). Вираз для потенціалу електричного поля такої системи досить громіздкий і приведений у [15]. Він отриманий за умови рівномірного заряду як на лінійному, так і пластинчатому електродах. Окрім розрахунків кривих потенціалу, за отриманим співвідношенням для пластинчатого провідника було виконане також фізичне моделювання поля.

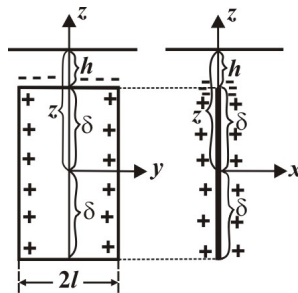


Рис. 5.9. Схема для розрахунку поля над плаstopодібним поляризованим покладом

Розрахунки й фізичне моделювання свідчать, що криві потенціалу для вертикального пласта мають симетричні гілки, аналогічно вертикально поляризованим кулі та циліндру. Величина аномалії зростає зі збільшенням протяжності пласта на глибину. Зі збільшенням глибини верхнього ребра пласта величина аномалії швидко зменшується (рис. 5.10).

Криві потенціалу для пласта з нахилом 60° до горизонту близькі за характером відповідним кривим для вертикального пласта. При нахилі 30° уже чітко проявляється асиметрія кривих. У напрямку падіння пласта спостерігається невеликий максимум і більш швидка зміна потенціалу, ніж у протилежному напрямку (рис. 5.10).

Аналіз кривих потенціалу показує, що ширина максимуму залежить головним чином від глибини верхнього ребра пласта й мало змінюється зі зміною кута падіння та протяжністю пласта на глибину.

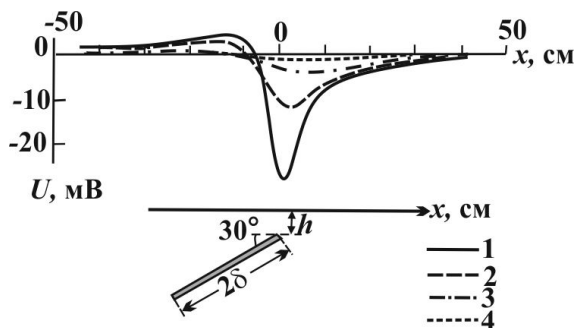


Рис. 5.10. Результати фізичного моделювання над нахиленим плоским поляризованим провідником ($\alpha = 30^\circ$, $2l = 30$ см, $2\delta = 3$ см):
 1 – $h = 3$ см; 2 – $h = 6$ см; 3 – $h = 15$ см; 4 – $h = 30$ см

Із аналізу результатів фізичного моделювання випливає, що для випадку, коли протяжність пласта на глибину 2δ не перевищує його довжини в горизонтальному напрямку $2l$, глибина h до його верхнього ребра (голови) може визначатися через довжину хорди q , проведеної через середину мінімуму, згідно з формулою:

$$h = (0,3 - 0,5) q.$$

Взявши середнє значення коефіцієнта при q , маємо $h = 0,4 q$. Глибини, визначені за цієї формулою, будуть дещо завищені для малих відношень глибини h до довжини провідника $2l$ і занижені для великих. Похибка визначення глибин коливається в межах $\pm 25\%$. При $\delta \gg l$ глибина $h = (0,3 - 0,5) q$.

Спосіб параметра q є ефективним при визначенні глибин до пластів малої товщини. При значній товщині пласта цей спосіб дає завищені глибини, оскільки криві над потужними пластами дають широкі мінімуми, а отже й велике значення параметра q . Щоб уникнути значних похибок при визначенні глибин до верхнього ребра пласта, необхідно паралельно користуватися також способом параметра m . За цим способом глибина h може бути оцінена згідно з формулою:

$$h \approx (0,4 - 0,7)m.$$

У наведеній формулі коефіцієнт 0,4 використовують при великій протяжності пласта на глибину, а коефіцієнт 0,7 – при малій. На практиці можна обмежитися середнім коефіцієнтом і визначати глибину за формулою:

$$h \approx 0,55m.$$

Визначення глибини плаstopодібного рудного покладу може виконуватися й за допомогою логарифмічних палеток. Палетки можуть використовуватися також і для визначення протяжності провідника щодо простягання. Для цього на палетках, побудованих для різних значень $2l/h$, криві, що відповідають двом головним профілям (одному вздовж простягання та другому – уперек простягання провідника), групуються попарно (приклад такої палетки наведений на рис. 5.11). Накладання таких пар спостережених кривих на відповідну пару теоретичних кривих дозволяє визначити як глибину, так і довжину пласта в горизонтальному напрямку. Отже, для визначення глибини й розмірів пласта за допомогою палеток необхідно знімати практичні криві як уперек, так і вздовж простягання пласта.

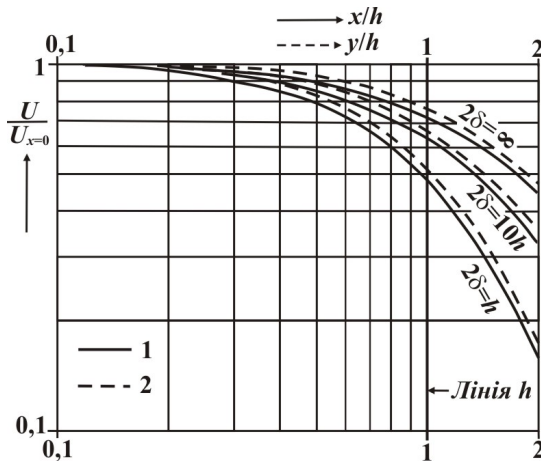


Рис. 5.11. Вигляд палетки потенціалу для вертикального плоского поляризованого провідника ($2l/h = 1$):

1 – профілі впоперек простягання провідника; 2 – профілі вздовж простягання провідника

Зараз існують також програмні розробки, що реалізують процес кількісної інтерпретації аномалій природного поля на комп'ютерах способом автоматизованого підбору параметрів поляризованих провідників у рамках відповідних моделей, розрахункові поля яких збігаються зі спостережуваними полями.

5.3. Область застосування методу природного поля

Пошуки й розвідка родовищ руд, що мають електронну провідність, а також вугілля є основною областю застосування методу природного поля. Роботи цим методом виконуються на мідноколчеданових, колчеданово-поліметалічних, мідно-нікелевих та сірчаноколчеданових родовищах. Тут інтенсивність аномалій варіює від десятків до декількох сотень мілівольт.

При геологічному картуванні метод природного поля використовується головним чином для локалізації порід, які мають у своєму складі розсіяні електропровідні мінерали – графіт, пірит і частково магнетит. У тих випадках, коли графітизація або сульфідизація належить зонам тектонічних порушень, метод природного поля може бути застосований для картування цих зон.

Існує можливість застосування методу ПП для картування тектонічно послаблених зон тоді, коли ці зони є шляхами розвантаження поверхневих вод у більш глибокі горизонти. Фільтраційні поля, що виникають при цьому, досягають десятків і навіть перших сотень мілівольт.

При інженерно-геологічних і гідрогеологічних дослідженнях зйомка природного поля дає інформацію про напрямок фільтрації підземних вод. Має місце успішне застосування цього методу для локалізації ділянок фільтрації підземних вод через основи гробель та інших інженерних споруд.

6. МЕТОД ВИКЛИКАНОЇ (СПРИЧИНЕНОЇ) ПОЛЯРИЗАЦІЇ

Метод ґрунтується на вимірюванні вторинних електричних полів електрохімічної та електрокінетичної природи, що виникають у гірських породах при протіканні в них електричного струму. Метод викликаної поляризації (ВП) є одним із провідних у комплексі геофізичних методів, що використовуються при пошуках і розвідці рудних родовищ.

Існують два основні варіанти вивчення поля спричиненої поляризації – *імпульсний* і *частотний*. У першому вивчають часові характеристики електричного поля після вимикання постійного струму в заземленій живильній лінії. У частотному варіанті методу ВП вивчають або амплітудні, або фазові характеристики електричного поля заземлених джерел, що живляться струмом інфранизької частоти (0,1 – 10 Гц).

Метод ВП застосовують у модифікаціях як *профілювання*, так і *зондування*. Для цього використовуються такі ж установки, як і в методах опорів. Найбільш поширені із них установки для зйомки *способом серединних градієнтів, комбінованого профілювання, симетричні чотириелектродні та дипольні осьові*.

При площових зйомках методом ВП основною установкою є установка для зйомки серединних градієнтів (модифікація ВП-СГ). Комбіноване профілювання методом ВП (модифікація КЕП-ВП) застосовують при детальних дослідженнях для пошуків плаstopодібних крутоспадних об'єктів. Також можуть застосовуватися дипольні двосторонні осьові установки. У простих геологічних ситуаціях виконуються профілювання симетричними установками (СЕП-ВП).

Зондування методом ВП (модифікація ВЕЗ-ВП) використовують при вивченні розривів із пологими межами поділу середовищ із різною поляризованістю, зокрема при пошуках пластових рудних покладів, вивченні шаруватих піщано-глинистих розривів та ін.

При вимірюванні викликаної поляризації в часовому (нестационарному) режимі в землю гальванічним способом (за допомогою електродів) подається постійний електричний струм, під дією якого протягом певного часу (зазвичай 2 – 3 хв) відбувається вимушена поляризація геологічного розрізу. Після вимикання струму поле ВП із плином часу зникає й відбувається процес деполяризації, у результаті якого різниця потенціалів із часом зменшується відповідно до закону, близького до експоненціального. Під час проходження в землі струму вимірюється різниця потенціалів між приймальними заземленнями й сила струму в живильній лінії, а після вимкнення струму – різниця потенціалів викликаної поляризації $\Delta U_{ВП}$. Ця різниця потенціалів вимірюється або в строго фіксований момент часу після вимкнення струму, або через певні його проміжки.

Швидкість і характер спаду процесу деполяризації залежить від поляризаційних властивостей геологічних утворень. На практиці інформацію про ці властивості отримують шляхом визначення миттєвого значення позірної поляризованості $\eta_{П}$ для вибраного моменту часу або вивчаючи залежність $\eta_{П}$ від часу.

Для визначення позірної поляризованості після подання в живильну лінію постійного електричного струму впродовж 2 – 3 хвилин (час зарядки середовища) його вимикають і на встановленій часовій затримці (зазвичай це 0,5 с) вимірюють різницю потенціалів $\Delta U_{ВП}$. Позірну поляризованість визначають:

$$\eta_{П} = (\Delta U_{ВП} / \Delta U_{ПР}) \cdot 100\%,$$

де $\Delta U_{ПР}$ – різниця потенціалів на електродах M і N приймальної лінії, виміряна під час пропускання струму перед його вимкненням. Одночасно, як правило, визначають і позірний опір: $\rho_{П} = K \cdot \Delta U_{ПР} / I$, де K – коефіцієнт установки. Взагалі методи опору та викликаної поляризації реалізуються в більшості сумісно (при наявності апаратури для вимірів неусталених полів). Зазвичай над рудними об'єктами, зокрема сульфідними та графітованими, спостерігаються аномалії суттєво підвищених значень $\eta_{П}$ (рис. 6.1).

Вивчення поляризаційних властивостей геологічного розрізу можна виконувати також і на змінному струмі. У цьому випадку ВП оцінюють у градусах фазового зсуву виміряного гармоній-

ного сигналу $E_{MN} \cdot \sin(\omega t + \varphi_{ВП})$ щодо струмового сигналу $I_{AB} \cdot \sin(\omega t)$, визначаючи таким чином затримку в реакції середовища щодо процесу дії зовнішнього поля. Потрібно зазначити, що явище викликаной поляризації досить інерційне й на високих частотах (>20 Гц) взагалі практично відсутнє.

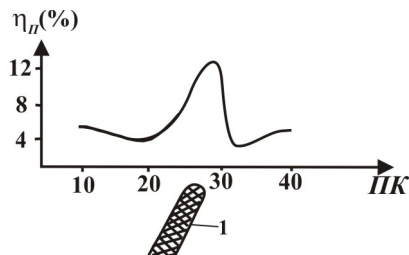


Рис. 6.1. Графік η_P над зоною графітизації й піритизації за даними ВП-СГ (за Комаровим В. О.):
1 – рудне тіло

Якщо середовище однорідне за поляризованістю, то позірна поляризованість співпадає з її істинним значенням. Для неоднорідного середовища η_P залежить від просторового розподілу ділянок порід із різною поляризованістю від їх питомого електричного опору, від розташування живильних і вимірювальних електродів і характеру поляризувального поля. Вивчаючи просторовий розподіл η_P , її залежність від вказаних чинників і враховуючи істинну поляризованість порід, що складають район, ми можемо, застосовуючи геологічні дані, установлювати особливості геоелектричного розрізу та на цій основі вирішувати завдання геологічно-картування й пошуків родовищ корисних копалин.

Вимірювання ВП можуть бути виконані декількома способами (див. рис. 6.2):

А) Імпульсний режим (часова область). Цей режим реалізується за допомогою спеціальних вимірювальних приладів для методу ВП, що дозволяють вимірювати $\Delta U_{ВП}$ у фіксований момент часу після вимкнення живильного струму (зазвичай 0,5 с, а при гідрогеологічних дослідженнях 1 с) й $\Delta U_{ПР}$ у момент пропускання струму. Величина позірної поляризованості η_P визначається за вищенаведеною формулою.

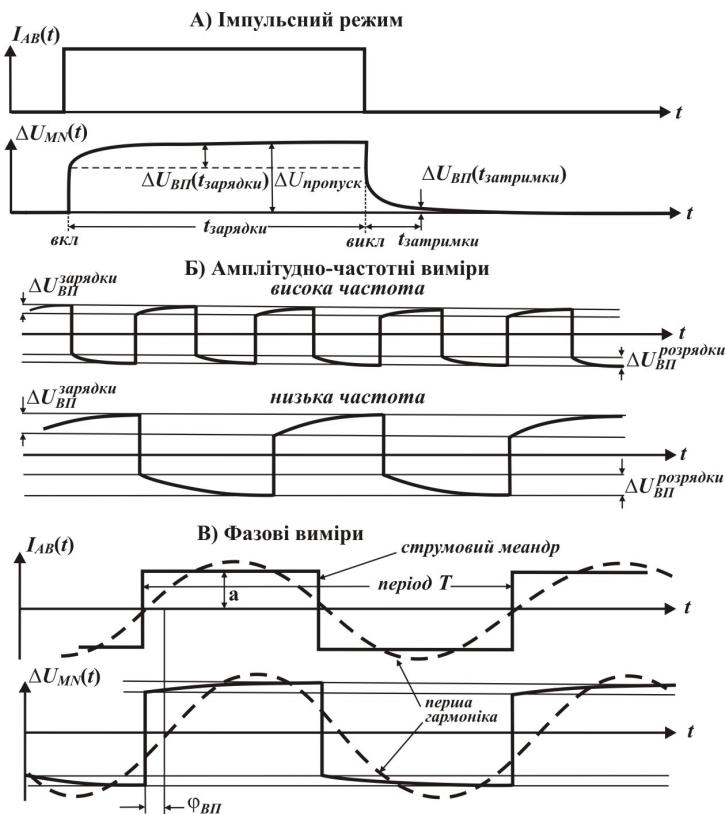


Рис. 6.2. Способи вимірювання ВП:
 А) імпульсний режим; Б) амплітудно-частотні виміри;
 В) частотно-фазові виміри

Б) Амплітудно-частотні вимірювання полягають у вимірах різниці потенціалів на двох частотах і розрахунку процентного частотного ефекту PFE :

$$PFE = \frac{\Delta U(\omega_{\text{низька}}) - \Delta U(\omega_{\text{висока}})}{\Delta U(\omega_{\text{низька}})},$$

де: $\Delta U(\omega_{\text{низька}})$ – різниця потенціалів, виміряна на низькій частоті;
 $\Delta U(\omega_{\text{висока}})$ – різниця потенціалів, виміряна на високій частоті.

Низька частота звичайно вибирається в інтервалі від 0,5 до 2 Гц, а висока – від 4 до 20 Гц. PFE пропорційний параметру η_{II} , оскільки в сигналі на низькій частоті викликана поляризація проявляється сильніше, ніж на високій частоті.

В) Частотно-фазові вимірювання виконуються за допомогою реєстрації різниці фаз сигналу у вимірювальній і струмовій лініях:

$$\varphi_{ВП} = \arctg \frac{\text{Im} F(\omega)}{\Delta U_0 + \text{Re} F(\omega)} ,$$

де $\text{Im} F(\omega)$ – уявна складова напруги ВП; $\text{Re} F(\omega)$ – дійсна складова напруги ВП; ω – кругова частота; ΔU_0 – напруга первинного поля. Експериментально встановлено, що для більшості гірських порід фаза ВП лінійно зв'язана з параметром позірної поляризованості η_{II} :

$$\eta_{II} = -2,5\varphi_{ВП}, \text{ в } \%.$$

При роботі методом ВП, як відмічалось вище, застосовуються ті ж установки, що й у методі опорів. Як і в методі опорів, розрізняють два способи вивчення позірної поляризованості: у першому досліджується залежність η_{II} і ρ_{II} від глибини проникнення струму (метод ВЕЗ-ВП), у другому – залежність η_{II} і ρ_{II} при переміщенні установки в горизонтальному напрямку щодо геологічних об'єктів (профілювання методом ВП). Розміри живильної та приймальної ліній в останньому випадку залишаються незмінними.

При профілюванні найчастіше застосовують установки серединного градієнта, симетричного та комбінованого електропрофілювання, а при вертикальному електричному зондуванні – симетричні установки $AMNB$.

У районах із низькими значеннями поляризованості й питомих електричних опорів гірських порід, що складають розріз, доцільно застосовувати симетричні установки, де $MN = 1/3 \cdot AB$ (установка Венера), оскільки вимірювана різниця потенціалів ΔU_{MN} у цьому випадку є найбільшою і її легше зареєструвати, у той же час установка залишається граничною, тобто можна вважати, що відношення вимірюваної різниці потенціалів ΔU_{MN} до розміру приймальної лінії MN із прийнятною точністю дорівнює напруженості електричного поля: $\Delta U_{MN}/MN \approx E$.

Найбільшими значеннями поляризованості характеризуються породи та руди з включеннями електропровідних мінералів: піриту, халькопіриту, галеніту, графіту, антрациту, – самородних металів (мідь самородна, ртуть, срібло, золото) і т. ін. Поляризованість таких порід буває, як правило, дуже високою – від 5 до 40% і більше.

Розрізняють два типи поляризованості електронних провідників: поверхневу та об'ємну. Поверхнева поляризованість характерна для суцільних рудних тіл великого розміру, у яких на поверхні під дією струму накопичуються вторинні заряди. При вимкненні струму протягом декількох секунд відбувається релаксація накопиченої енергії. Для вкраплених руд, які не виявляються іншими методами геофізики, характерна об'ємна поляризація. При пошуку таких об'єктів метод ВП є головним методом досліджень. Безрудні породи (осадові та магматичні) поляризуються значно слабше: їх поляризованість змінюється від 0,5 до 3%. Крім того, метод ВП також застосовується в гідрогеологічній геофізиці для визначення рівня ґрунтових вод і виявлення різних літологічних комплексів порід у розрізі завдяки помітній залежності поляризованості осадкових порід від вологості, глинистості, пористості.

Таким чином, основні області застосування методу ВП – це пошуки рудних покладів, гідрогеологія та геологічне картування. Слід зазначити, що останнім часом метод ВП знаходить все більше застосування при пошуках нафтогазових родовищ. Як показали численні польові експерименти, над вуглеводневими покладами утворюються скупчення вкраплень піриту, що створює фізичні передумови для пошуків й оконтурювання родовищ нафти та газу.

6.1. Вертикальні електричні зондування методом викликаної поляризації

Вертикальні електронзондування методом викликаної поляризації (ВЕЗ-ВП) виконуються для літологічного розчленування розрізу осадкових відкладів та вивчення сульфідизованих і графітизованих зон на глибину. Для польових досліджень використовується симетрична чотирьохелектродна установка Венера *AMNB*.

Монтаж установки. На рис. 6.3 показана монтажна схема установки для роботи методом ВЕЗ-ВП.

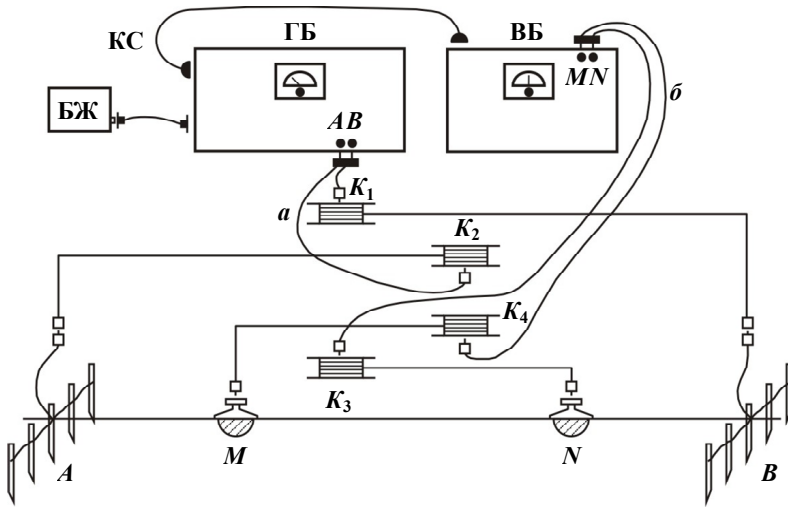


Рис. 6.3. Монтажна схема установки Венера для роботи методом ВЕЗ-ВП

Проводи лінії живлення AB намотані на дві котушки K_1 і K_2 по 500 м кожна. Для збільшення розносів живильної лінії провід із котушок розмотується в обидва боки від центра установки, розміщеного на точці зондування. Одночасно зі збільшенням розносів живильної лінії збільшують розноси приймальної лінії MN , розмотуючи проводи приймальної лінії з котушок K_3 і K_4 так, щоб зберігалася рівність $MN = 1/3 \cdot AB$. Для визначення стандартних відстаней на проводах живильної та приймальної ліній ставляться мітки за допомогою ізоляції та алюмінієвого або мідного дроту.

Котушки лінії AB K_1 і K_2 підключаються до клем AB генераторного блоку приладу за допомогою трійника a , у якого на одному кінці є двополюсна електророзвідувальна вилка, а на двох інших – однополюсні вилки (див. рис. 6.3). За допомогою такого ж трійника b підключаються котушки приймальної лінії до клем MN вимірювального блоку.

У таблиці 6.1 показані стандартні відстані між живильними та приймальними заземленнями, а також відповідна розмітка проводів при зондуванні з $AB/2$ до 600 м.

Таблиця 6.1

$AB/2$, м	$MN/2$, м	Число міток	$AB/2$, м	$MN/2$, м	Число міток
3	1	1	75	25	3
4,5	1,5	2	105	35	1
6	2	3	150	50	2
9	3	1	225	75	3
12	4	2	300	100	1
18	6	3	450	150	2
27	9	1	600	200	3
45	15	2			

Методика польових робіт. Установка для ВЕЗ-ВП збирається відповідно до монтажною схемою, зображеною на рис. 6.3, при цьому оператор, обчислювач, апаратура й обладнання розміщуються в точці зондування, тобто в центрі установки. Працівники на живильних і приймальних заземленнях знаходяться біля відповідних заземлень A , B , M , N .

Підготовка апаратури до вимірів виконується відповідно до інструкції по експлуатації конкретного типу апаратури, що використовується для електрометричних досліджень. Для підготовки апаратури до вимірів здійснюють наступні основні операції:

1. Генераторний і вимірювальний блоки встановлюють на ізоляційній основі та з'єднують кабелем синхронізації (КС). Лінія AB підключається до клем генераторного блоку AB , а лінія MN – до клем вимірювального блоку MN . Усі перемикачі та тумблери на обох приладах приводяться в положення "вимк". Від блоку живлення, перемикач якого теж встановлюється в положення "вимк", до генераторного блоку підводиться кабель. Корпуси вимірювального й генераторного блоків з'єднуються між собою та заземляються в точці спостереження.

2. Перевіряється працездатність генераторного блоку ГВ згідно з інструкцією з експлуатації. Перевіряють напругу джерел живлення схеми генераторного блоку. Змінюючи перехідні опори живильних заземлень A і B , слід переконатися в тому,

що при збільшенні або зменшенні перехідних опорів стрілка індикаторного приладу реагує відповідно зменшенням або збільшенням показів на шкалі індикаторного приладу ГБ. Після закінчення перевірки треба вимкнути струм у живильній лінії, а перемикач "живлення" на панелі блоку генератора поставити в положення "вимк".

3. Перевіряється працездатність вимірювального блоку ВБ. Для цього, користуючись перемикачем "живлення" ВБ, виконують перевірку напруги живлення вимірювального блоку.

4. Вимірювання виконуються згідно з інструкцією з експлуатації застосовуваної апаратури.

Результати спостережень записуються в польовий журнал, який при роботі в імпульсному режимі (апаратура типу МЭРС-16), має наступний вигляд:

Ділянка – "Скеляста" Дата – 06.03.2011. Ясно, сухо.
Профіль – III. Початок спостережень – 7 год 30 хв.
Пікет – +4. Кінець спостережень – 14 год 10 хв.
Оператор – Харламов В.Б. Обчислювач – Тарасов А.В.

№ виміру	$AB/2$, м	$MN/2$, м	K , м	t_3 , с	ΔU_{IP} , мВ	$\Delta U_{ВЛ0,5}$, мВ	I , мА	η_{IP} , %	ρ_{IP} , Ом·м	Примітки

Оператор _____ Обчислювач _____
 (підпис) (підпис)

При дослідженнях амплітудно-частотним способом із визначенням частотного ефекту *PFE* (апаратура типу ЭРП-1) форма така:

Ділянка – "Скеляста". Дата – 06.03.2012. Ясно, сухо.
Профіль – III. Початок спостережень – 7 год 30 хв.
Пікет – -4. Кінець спостережень – 14 год 10 хв.
Оператор – Малкін Є. В. Обчислювач – Овечкін О. М.

№ виміру	$AB/2$, м	$MN/2$, м	K , м	$\Delta U_{1,22}$, мВ	$\Delta U_{4,88}$, мВ	I , мА	<i>PFE</i>	ρ_{IP} , Ом·м	Примітки

Оператор _____ Обчислювач _____
 (підпис) (підпис)

Після кожного виміру обчислювач розраховує значення η_{Π} і ρ_{Π} або PFE і ρ_{Π} , записує їх у відповідні граfi журналу та наносить точки на граfiки ВЕЗ-ВП. Якщо нові нанесені точки не порушують плавний хід граfiків, оператор подає команду до збільшення розносу живильних і вимірювальних заземлень. В іншому випадку виконується повторний вимір. Слід відзначити, що сучасна електророзвідувальна апаратура дозволяє виконувати необхідні обчислення в автоматичному режимі.

Для якісного проведення польових вимірів необхідно, щоб вимірювані різниці потенціалів були не менші, а більше ніж у 10 разів вищі за рівень завад і в той же час не нижче 0,5 мВ. Правильність спостережень перевіряють шляхом контрольних і повторних вимірів.

Контрольні спостереження (контрольні ВЕЗ-ВП) ведуться іншим оператором (або начальником геофізичного загону) через деякий час після основних вимірювань. Загальний обсяг контрольних вимірів повинен складати не менше 5% від кількості рядових точок. Повторні спостереження проводяться безпосередньо за основними тим же оператором за допомогою того ж приладу на всіх точках, де спостерігалися високі завади, або якщо величини η_{Π} (PFE) і ρ_{Π} не узгоджуються із загальним ходом відповідних граfiків. Здійснювати контрольні спостереження слід приблизно при тих же величинах поляризувального струму, що й основні. Похибка вимірів по ρ_{Π} повинна складати не більше 5%, а по η_{Π} (PFE) – не більше 10%.

Обробка результатів польових спостережень. При виконанні вимірів методом ВЕЗ-ВП у польових умовах обчислювач розраховує η_{Π} (PFE) і ρ_{Π} і будує на логарифмічному бланку криві ВЕЗ-ВП. Основна обробка результатів спостережень здійснюється в камеральний час. Останнє завдання камеральної обробки результатів спостережень полягає в зображенні їх у вигляді, зручному для кількісної і якісної інтерпретації. При цьому слід дотримуватися певної послідовності в оформленні матеріалів: 1) перевіряють обчислення η_{Π} (PFE) і ρ_{Π} у журналі польових спостережень; 2) будують польові криві ВЕЗ-ВП на білогарифмічних бланках; 3) наносять на бланки граfiки контрольних спостережень і розраховують похибку вимірів;

4) так само, як і в методі опорів, будують профілі кривих ВЕЗ-ВП, графіки, карти графіків і карти ізоліній позірної поляризованості для одного-двох розносів $AB/2$.

Інтерпретація даних зондування методом ВП спрямована на розчленування геоелектричного розрізу за параметрами поляризованості та питомого електричного опору та багато в чому подібна інтерпретації в методі ВЕЗ. Так само, як і в методі ВЕЗ, вона буває якісною та кількісною. На етапі *якісної інтерпретації* будуються карти ізоліній позірної поляризованості та електричного опору у вертикальній площині вздовж профілю спостережень (вертикальні розрізи η_{Π} і ρ_{Π}) та графіки позірної поляризованості (при площових роботах карти графіків чи ізоліній η_{Π} та ρ_{Π}) для фіксованих розносів $AB/2$. *Кількісна інтерпретація кривих* η_{Π} та ρ_{Π} так само, як і в методі ВЕЗ виконується за допомогою палеток і спеціалізованих комп'ютерних програм (метод автоматизованого підбору). При інтерпретації ВЕЗ-ВП використовується пакет спеціалізованих програм ІРІ, розроблених у Московському державному університеті імені М. В. Ломоносова. За результатами кількісної інтерпретації виконується розчленування геологічного розрізу на окремі горизонти за питомим опором та поляризованістю та побудова відповідних геоелектричних моделей.

Завдання

1. Змонтувати установку для вертикальних електричних зондувань методом ВП відповідно до монтажною схемою, зображеною на рис. 6.3. При цьому необхідно виконати наступні операції: а) підготувати проводи живильної та приймальної ліній. Для цього чотири відрізки проводу розмічають відповідно до таблиці 6.1 так само, як це робиться в методі ВЕЗ. На початок ліній приєднують електророзвідувальні вилки, а кінці їх приєднують до клем, встановлених на електророзвідувальних котушках K_1 , K_2 , K_3 і K_4 (див. рис. 6.3). Початкові мітки ("нульові") закріплюють на проводі на відстані 1 м від початку проводу; б) виготовити заземлення живильних ліній; в) підготувати допоміжні з'єднання.

2. Підготувати до роботи комплект неполяризованих електродів.

3. Вивчити функціональну схему застосовуваної електророзвідувальної апаратури та правила роботи з нею.

4. Підготувати апаратуру до роботи.
5. Виконати вертикальні електричні зондування методом ВП за схемою Венера.
6. Обробити результати вимірів і побудувати графіки ВЕЗ-ВП (η_{II} і ρ_{II} або PFE і ρ_{II}).
7. Дати коротке геологічне тлумачення результатів електрозондування.
8. Після закінчення робіт бригада представляє наступні звітні матеріали: 1 – польовий журнал; 2 – альбом кривих ВЕЗ-ВП (η_{II} (PFE) й ρ_{II}); 3 – карту ізоліній η_{II} (PFE) й ρ_{II} ; 4 – коротке геологічне тлумачення результатів роботи.

6.2. Профілювання методом ВП

При проведенні навчальної практики зйомка методом ВП буде виконуватись симетричною установкою (модифікація ВП-СЕР). Параметри установки визначаються геологічними задачами.

Монтажна схема установки. На рис. 6.4 показана монтажна схема для виконання профілювання методом ВП симетричною установкою. Для навчальної практики доцільно відстань між живильними заземленнями вибрати 60 м, а відстань між приймальними заземленнями – 20 м.

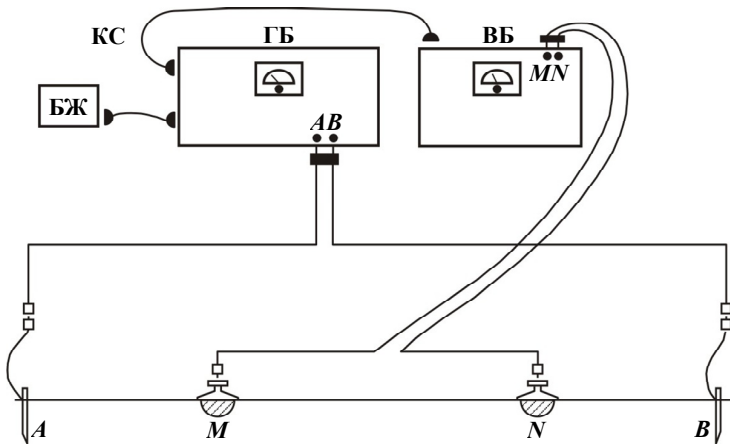


Рис. 6.4. Монтажна схема установки для профілювання методом ВП

Для виготовлення живильної лінії беруться 2 відрізки завдовжки по 32 м, на яких ставляться мітки так, щоб відстань між ними складала 30 м. На одному кінці кожного відрізка монтується електророзвідувальна вилка, а два інші кінці приєднуються до двополусної вилки, що підключається до клем *AB* генератора.

Для приймальної лінії відмірюються два відрізки проводу завдовжки по 12 м, на яких мітками відзначаються відстані 10 м. До одних кінців цих відрізків приєднуються однополусні, а до інших – двополусні вилки, що йдуть до вимірювального блоку (до клем *MN*).

Живильні заземлення виготовляються зі стрижневих електродів, які приєднуються до невеликих відрізків проводу завдовжки 30 – 50 см кожний. На кінцях цих відрізків монтуються електророзвідувальні вилки.

Для вимірювальних заземлень використовують неполяризовані електроди. Правила поводження з ними викладені в главі 5.

Методика польових робіт. Польові операції при проведенні профілювання ВП симетричною установкою включають: а) підготовку установки до роботи; б) підготовку апаратури до вимірів; в) виконання вимірів.

Установка збирається відповідно до монтажної схеми, зображеної на рис. 6.4. Пункти "б" і "в" виконуються так само, як і при зондуваннях ВП. Після кожного виміру обчислювач розраховує значення $\eta_{\text{л}}$ і $\rho_{\text{л}}$ і записує їх у відповідні графі журналу, після чого наносить точки на графіки $\eta_{\text{л}}$ і $\rho_{\text{л}}$. Якщо ці точки не порушують плавного ходу графіків, оператор подає команду до переходу на наступну точку. В іншому випадку виконується повторний вимір або контроль лінії живлення на витік струму.

Контрольні спостереження здійснюються іншим оператором і з іншим приладом через деякий час після проведення основних вимірів. Вимоги до контрольних вимірів такі ж, як і при виконанні робіт методом ВЕЗ-ВП.

При роботах імпульсним способом результати спостережень записуються в журнал, форма якого наведена нижче.

Ділянка – "Північна". Дата – 10.09.2011. Погода – ясно, сухо.
Профіль – П. Початок спостережень – 9 год 00 хв.
 $AB = 60$ м; $MN = 20$ м. Кінець спостережень – 15 год 00 хв.
 $K = 40,0$ м; крок – 20 м.

Оператор – Ковальчук І. В. Обчислювач – Дацюк П. В.

№ точ-ки	t, c	$\Delta U_{PP}, мВ$	$\Delta U_{ВП}, мВ$	$I, мА$	$\rho_{П}, Ом\cdot м$	$\eta_{П}, \%$	Примітки

Оператор _____ Обчислювач _____
 (підпис) (підпис)

При дослідженнях амплітудно-частотним способом із визначенням частотного ефекту *PFE* (апаратура типу ЕРП-1) форма журналу має вигляд:

Ділянка – "Північна". Дата – 10.09.2011. Погода – ясно, сухо.
Профіль – П. Початок спостережень – 9 год 00 хв.
 $AB = 60$ м; $MN = 20$ м. Кінець спостережень – 15 год 00 хв.
 $K = 40,0$ м; крок – 20 м.

Оператор – Федотенко Р. В. Обчислювач – Христич Д. А.

№ точки	t, c	$\Delta U_{1,22}, мВ$	$\Delta U_{4,88}, мВ$	$I, мА$	$\rho_{П}, Ом\cdot м$	<i>PFE</i>	Примітки

Оператор _____ Обчислювач _____
 (підпис) (підпис)

Обробка результатів польових спостережень. Обчислювач розраховує та заносить у польовий журнал результати обчислень $\eta_{П}$ (*PFE*) й $\rho_{П}$ і будує в польових умовах графіки $\eta_{П}$ (*PFE*) й $\rho_{П}$. Подальша обробка польових спостережень здійснюється в камеральний час. Послідовність в оформленні матеріалів при цьому наступна: 1) перевіряють обчислення $\eta_{П}$ (*PFE*) й $\rho_{П}$ у журналі польових спостережень; 2) будують чистові графіки профілювання ВП у масштабі, що відповідає масштабу зйомки; 3) наносять на графіки результати контрольних спостережень й обчислюють похибки вимірів.

Інтерпретація результатів профілювання методом ВП, в основному, *якісна*. Вона зводиться до виділення аномалій із підвищеною позірною поляризованістю щодо фонових значень, які складають близько 0,5 – 1 %. Над піритизованими чи графітизованими породами поляризованість досягає 5 – 10 % і більше. Над провідними сульфідними зруденіннями η_{II} може досягати перших десятків відсотків. На рисунку 6.1 наведений приклад застосування методу ВП.

Для окремих аномалій, спричинених локальними об'єктами простої форми, можна застосовувати *кількісну інтерпретацію*. Вона ґрунтується на аналітичних розв'язках прямої задачі для тіл простої геометричної форми: кулі, циліндра, вертикального пласта та ін. [9, 16].

Аналіз графіків η_{II} над нахиленими тілами свідчить, що графіки асиметричні. Аномалії плавно зростають уздовж підйому тіла та круто спадають із біля його "голови" (рис. 6.1). Над крутоспадними тілами, що розповсюджуються на значні глибини, спостерігаються окремі максимуми, а над ізометричними рудними об'єктами ці максимуми супроводжуються боковими мінімумами. Відстань між мінімумами приблизно в 2 рази більша від глибини до центра об'єкта.

Завдання

1. Змонтувати установку для симетричного профілювання ВП.
2. Підготувати до роботи комплект неполяризованих електродів.
3. Виконати електропрофілювання СП із кроком 20 м по заздалегідь розбитих профілях, указаних викладачем.
4. Обробити результати вимірів і побудувати графіки η_{II} (PFE) й ρ_{II} .
5. Дати коротке геологічне тлумачення результатів симетричного профілювання ВП.

Після закінчення робіт бригада подає наступні звітні матеріали:

- 1) польовий журнал; 2) графіки кривих η_{II} (PFE) й ρ_{II} ;
- 3) коротке геологічне тлумачення результатів роботи.

Окрім наземних досліджень, метод викликаної поляризації може застосовуватися також у гірських виробках для вивчення рудоконтролюючих структур і пошуків "сліпих" рудних тіл, а також у свердловинному варіанті при виконанні робіт щодо міжсвердловинної електричної кореляції рудних об'єктів (МЕК–ВП) і вивченні будови навколосвердловинного простору.

7. МАГНІТОТЕЛУРИЧНІ МЕТОДИ

Магнітотелуричні методи ґрунтуються на вимірах варіацій (змін у часі) природного електромагнітного поля Землі космічного походження. Серед групи магнітотелуричних методів найбільш використовуваними в практиці прикладних геофізичних досліджень є магнітотелуричні зондування (МТЗ), магнітотелуричні профілювання (МТП) та метод телуричних струмів (МТС). Перший із них відноситься до класу зондувань, два інших – до класу профілювань.

7.1. Магнітотелуричне зондування

Основу магнітотелуричних зондувань (МТЗ) складає індукційний принцип, що ґрунтується на явищі *скін-ефекту* – пропорційній залежності глибини проникнення електромагнітного поля від періоду коливань T (див. гл. 2, п. 2.2.1).

У методі МТЗ на одній точці виконується реєстрація (як правило цифрова) варіацій п'яти компонентів магнітотелуричного поля – двох електричних E_x , E_y і трьох магнітних H_x , H_y , H_z . Тривалість запису варіацій може коливатися від 2 до 5 – 6 годин залежно від інтенсивності магнітотелуричного поля (МТ-поля) і його спектрального складу. При реєстрації варіацій датчиками електричного поля є приймальні лінії MN розміром 200 – 1000 м, заземлені на кінцях неполяризованими (інколи свинцевими) електродами, а магнітно-магнітоелектричні чи ферозондові магнітометри (при реєстрації низькочастотних варіацій) або індукційні датчики магнітного поля (при реєстрації високочастотних варіацій). Вибір системи координат на точці підпорядковується правилу: за координатний напрямок x приймається той напрямок розмотування однієї із приймальних ліній MN , який є ближчим до географічного напрямку "захід-схід", відповідно за y – напрямок розмотування, ближчий до географічного напрямку "північ-південь".

Отримані записи варіацій МТ-поля (*телуро* – і *магнітограми*) підлягають обробці (як правило комп'ютерній), під час якої виконується їх *спектральний аналіз*. У результаті спектрального

аналізу зареєстрованих варіацій виділяються монохроматичні гармонійні складові МТ-поля в широкому діапазоні періодів – від 0,01 – 0,1 с до декількох хвилин. У рамках моделі квазістаціонарного плоского електромагнітного поля (гл. 2, п. 2.2) для кожної спектральної складової визначається модуль імпедансу $|Z|$ і його фаза φ_T , яка дорівнює аргументу імпедансу: $\varphi_T = \text{Arg}Z = \arctg(\text{Im}Z/\text{Re}Z)$. Сам імпеданс є величиною комплексною й виражається як відношення взаємно ортогональних компонент електричного та магнітного полів:

$$Z = E_x/H_y = -E_y/H_x.$$

За модулем $|Z|$ розраховується *ефективний (позірний) опір* ρ_T геоелектричного розрізу:

$$\rho_T = |Z|^2 / \omega\mu \approx 126,7 \cdot 10^3 |Z|^2 T,$$

де $\omega = 2\pi/T$ – кругова частота (T – період коливань), $\mu = 4\pi \cdot 10^{-7}$ Гн/м – абсолютна магнітна проникність вакууму.

Наведена формула для визначення ефективного опору записана в Міжнародній системі одиниць СІ, яка передбачає виміри напруженості електричного поля у В/м, а магнітного поля – в А/м (як наслідок, імпеданс визначається в омах). В укрупненій практичній системі одиниць, яка звичайно використовується при магнітотелуричних дослідженнях і передбачає виміри електричного поля в мВ/км, а магнітного в гамах (γ), розрахунок ρ_T ведеться за наступною формулою:

$$\rho_T = 0,2|Z|^2 T.$$

Залежності ефективного опору ρ_T , фази імпедансу φ_T і його модуля $|Z|$ від кореня квадратного із періоду \sqrt{T} , отримані за результатами спектрального аналізу, називаються *кривими МТЗ – амплітудною, фазовою та імпедансною* відповідно. Для візуалізації кривих МТЗ виконуються їх графічні побудови: амплітудна та імпедансна криві будуються на логарифмічних бланках модуля 6,25 см, а фазова – на напівлогарифмічних (абсциса \sqrt{T} відкладається в логарифмічному масштабі, ордината φ_T – у пропорційному,

в 1 см 10°). Завдяки скін-ефекту криві МТЗ несуть інформацію про глибинну структуру геоелектричного розрізу і є вихідними даними, що підлягають інтерпретації з метою вивчення геоелектричної будови розрізу. Особливу увагу приділяють амплітудним кривим ефективного опору $\rho_T(\sqrt{T})$, адже вони, як і криві позірного опору в методах зондувань на постійному струмі, візуально відображають структуру геоелектричного розрізу (рис. 7.1).

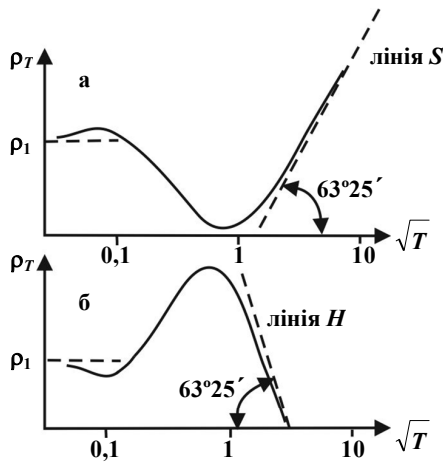


Рис. 7.1. Тришарові амплітудні криві МТЗ:
 а – крива типу H ($\rho_3 = \infty$); б – крива типу K ($\rho_3 = 0$);
 - - - - асимптоти кривих МТЗ

Якщо основа розрізу є ізолятором ($\rho_N = \infty$) або ідеальним провідником ($\rho_N = 0$), криві МТЗ мають довгоперіодні інтервали, на яких імпеданс Z і ефективний опір ρ_T залежать лише від узагальнених характеристик геоелектричного розрізу – сумарної поздовжньої провідності S відкладів до непровідної основи чи сумарної їх потужності H до ідеально провідної основи. Ці інтервали відповідно називаються *інтервалом S* і *інтервалом H* . За проведеною у вказаних асимптотичних інтервалах висхідною під кутом $\arctg 2 = 63^\circ 25'$ лінією S (рис. 7.1а) чи нисхідною під кутом $\arctg(-2) = -63^\circ 25'$ лінією H (рис. 7.1б) досить просто визначити відповідно сумарну поздовжню провідність та сумарну потужність відкладів до поверхонь непровідної та ідеально

провідної основ розрізу. Для цього на проведеній відповідній асимптотичній лінії вибирається довільна точка й визначаються її координати – абсциса ρ_T та ордината \sqrt{T} . Узагальнені характеристики розрізу – сумарна повздовжня провідність S і сумарна потужність відкладів H , розраховуються за формулами:

$$S = \sqrt{T} / \sqrt{2\pi\mu\rho_T} \approx 356\sqrt{T/\rho_T};$$

$$H = \sqrt{T\rho_T} / \sqrt{2\pi\mu} \approx 356\sqrt{T\rho_T}.$$

Метод МТЗ має суттєву перевагу над методами електричних зондувань на постійному струмі. Він полягає в тому, що пласти високого опору, які є екранами для методів ВЕЗ і ДЗ, для магнітотелуричних полів є проникними. Отже, методом МТЗ можна вивчати заекрановані високоомними екранами товщини.

У МТЗ, як і в зондуваннях на постійному струмі, має місце принцип еквівалентності. Для тришарових кривих МТЗ типу H та A , як і для кривих ВЕЗ, характерна S_2 – еквівалентність, а для кривих МТЗ типу K та Q , на відміну від кривих ВЕЗ, характерна h_2 – еквівалентність (еквівалентність за потужністю проміжного горизонту). Це означає, що якщо $h_2 = \text{const}$, а ρ_2 змінюється в певних межах, то крива МТЗ залишається практично незмінною.

За наявності в розрізі горизонтальних неоднорідностей імпеданс не є інваріантом (незалежною величиною) щодо просторової орієнтації системи координат. А тому в теорії методу МТЗ використовується модель тензора імпедансу, згідно із якою лінійний зв'язок між напруженістю електричного й магнітного полів здійснюється в тензорній формі: $\vec{E} = \hat{Z}\vec{H}$,

де $\hat{Z} = \begin{pmatrix} Z_{xx} & Z_{yx} \\ Z_{xy} & Z_{yy} \end{pmatrix}$ – тензор імпедансу; Z_{xx} , Z_{yx} , Z_{xy} , Z_{yy} –

компоненти тензора імпедансу (Z_{xy} , Z_{yx} – головні імпеданси; Z_{xx} , Z_{yy} – додаткові імпеданси). У явній формі цей зв'язок між електричним і магнітним полями записується у вигляді системи двох рівнянь:

$$E_x = Z_{xx}H_x + Z_{xy}H_y,$$

$$E_y = Z_{yx}H_x + Z_{yy}H_y.$$

У теорії методу МТЗ [19] розроблена методика визначення компонентів тензора імпедансу за даними реєстрації варіацій МТ-поля й на цій основі – ефективного імпедансу Z_{ef} , який є інваріантом щодо просторової орієнтації системи координат:

$$Z_{ef} = \sqrt{Z_{xx}Z_{yy} - Z_{xy}Z_{yx}}.$$

Ефективний імпеданс є основною вихідною інформацією для розрахунку фазових та амплітудних кривих МТЗ.

При відсутності горизонтальних неоднорідностей (випадок одновимірної моделі середовища) додаткові імпеданси дорівнюють нулю ($Z_{xx} = Z_{yy} = 0$), а головні імпеданси однакові, але протилежні за знаком і дорівнюють імпедансу Z плоского гармонійного електромагнітного поля на поверхні горизонтально-шарового розрізу:

$$Z_{xy} = -Z_{yx} = E_x/H_y = -E_y/H_x = Z.$$

Цілком очевидно, що в даному випадку ефективний імпеданс також буде дорівнювати імпедансу Z : $Z_{ef} = Z$.

Розв'язок задачі про імпеданс плоского гармонійного електромагнітного поля на поверхні горизонтально-шарового розрізу з довільною кількістю немагнітних шарів N , яка в теорії магнітотелуричних методів отримала назву задачі Тихонова-Каньяра, приводить до наступного рекурентного співвідношення для імпедансу:

$$Z = Z_1 \cdot \text{cth} \left\{ k_1 h_1 + \text{arcth} \left[\sqrt{\frac{\rho_2}{\rho_1}} \text{cth} \left(k_2 h_2 + \dots + \text{arcth} \sqrt{\frac{\rho_N}{\rho_{N-1}}} \right) \right] \right\}$$

де: $Z_1 = \sqrt{-i\omega\rho_1\mu}$ – імпеданс першого шару ($i = \sqrt{-1}$ – уявна одиниця), $k_i = \sqrt{-i\omega\gamma_i\mu}$ – комплексні хвильові числа пластів ($i=1, 2, \dots, N$), $\gamma_i = 1/\rho_i$ – питомі електричні провідності шарів (ρ_i – їх питомі опори), h_i – потужності шарів ($i = 1, 2, \dots, N-1$). Дане співвідношення використовується при розрахунках теоретичних кривих МТЗ.

На сучасному етапі значна увага в практиці магнітотелуричних методів приділяється *математичному моделюванню* магнітотелуричних полів у горизонтально-неоднорідних середови-

щах. Як відмічалось у гл.1, неоднорідні середовища поділяють на дво- та тривимірні. Алгоритмічні й програмні розробки для моделювання МТ-полів у двовимірних середовищах нині мають практично промислове застосування, а для моделювання в тривимірних середовищах знаходяться на етапі їх все більшого упровадження в практику МТ-методів, перш за все при вирішенні наукових задач із вивчення глибинної геоелектричної будови Землі.

Монтажна схема електрометричної установки для роботи методом МТЗ показана на рис. 7.2.

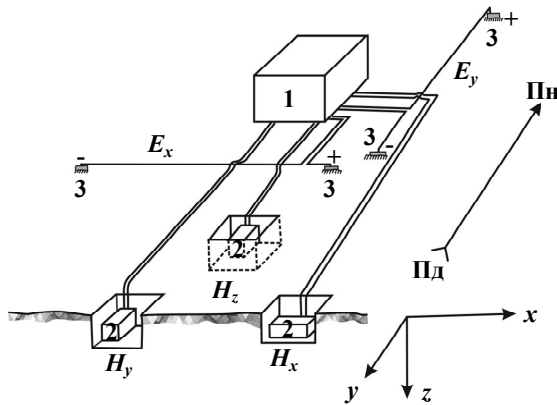


Рис. 7.2. Установка для магніотелуричних вимірів:
 1 – магніотелурична станція; 2 – магнітметри;
 3 – заземлення приймальних ліній

Установка являє собою дві приймальні лінії MN , призначені для вимірювання варіацій електричного поля у двох взаємно перпендикулярних напрямках. Кожна лінія монтується із 2-х відрізків проводу ГПСМПО. Кожний відрізок одним кінцем за допомогою облаштованого виводу приєднується до неполярного електрода, а іншим кінцем підключається до магніотелуричної станції. За допомогою цих приймальних ліній реєструються варіації напруженості природного електричного (телуричного) поля E_x і E_y у точці спостережень. Окрім того, польова установка включає три спеціальних магнітметри для реєстрації варіацій двох горизонтальних та вертикальної компонентів напруженості магнітного поля H_x , H_y , і H_z .

Методика робіт. При магнітотелуричному зондуванні та профілюванні застосовують прямокутні вимірювальні установки, що складаються, як відмічалось вище, із двох заземлених приймальних ліній " E_x ", " E_y " та трьох магнітометрів " H_x ", " H_y ", " H_z " (рис.7.2). Магнітотелуричні дослідження проводяться в наступному порядку: на точці досліджень розмотуються електричні лінії у двох вибраних взаємно ортогональних координатних напрямках. Азимути осей x , y (азимути розмотки проводів) намічають бусоллю з точністю до $\pm 0,5^\circ$. За вісь x приймається напрямок, ближчий до широтного, а за вісь y – напрямок, ближчий до меридіонального. Кут α , утворений віссю x і широтним напрямком, не повинен перевищувати 45° . Додатні напрямки осей x , y повинні відповідати правосторонній декартовій системі (поворот від x до y повинен відбуватися за годинниковою стрілкою). При спрямуванні осі z вертикально вниз додатним напрямком осі x буде "схід", а осі y – "південь" (рис. 7.2).

Найбільш часто приймальні лінії розмотують у вигляді букви Г (Г-подібна установка (рис. 7.2)). Інколи використовують Т-подібну чи хрестоподібну установки. Точність розмотки проводів у заданому напрямку $\pm 2^\circ$. Орієнтацію координатних напрямків x , y в загальному випадку вибирають так, щоб було зручніше розмотувати проводи. Бажано, щоб ці напрямки були якомога ближчими до географічних напрямків "захід-схід" і "північ-південь". На ділянках із лінійною тектонікою осі x , y розташовують по основних тектонічних напрямках (по падінню і простяганню опорного горизонту, перпендикулярно та паралельно осям витягнутих структур, лініям розломів і т. ін.).

Приймальні лінії заземляють за допомогою неполяризованих електродів. При цьому відстань між ближніми заземленнями Г-подібної установки повинна складати 10 – 20 м. Не рекомендується заземляти приймальні лінії поблизу обривів, берегів рік й озер, а також поблизу високих дерев. Проводи приймальних ліній повинні бути щільно укладеними на землю для запобігання їх розгойдуванню (при розгойдуванні проводів виникають інтенсивні завади, індуковувані постійним геомагнітним полем).

Заземлення приймальних ліній підключають до клем вхідної панелі електричних каналів магнітотелуричної станції, як показано в таблиці 7.1.

Таблиця 7.1

Канали	" E_x "		" E_y "	
	+	-	+	-
Приєднуване заземлення	Заземлення, розташоване ближче до сходу	Заземлення, розташоване ближче до заходу	Заземлення, розташоване ближче до півночі	Заземлення, розташоване ближче до півдня

Приклад визначення полярності заземлень приведений на рис. 7.3.

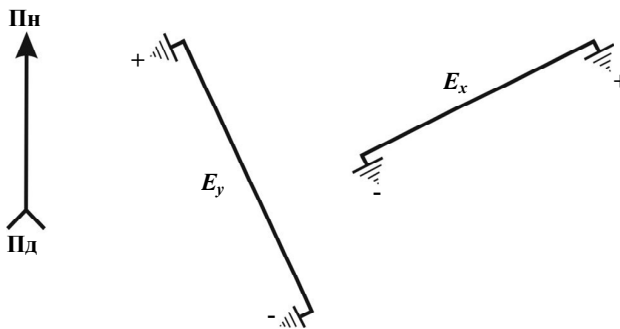


Рис. 7.3. Визначення полярності заземлень приймальних ліній

Рекомендована в табл. 7.1 схема підключення заземлень підібрана так, щоб записи електричних і магнітних коливань були близькими по фазі. Порівнюючи полярність заземлень із полярністю осей x , y , можна сказати, що канал " E_x " має пряму, а канал " E_y " – обернену полярність.

Магнітометри встановлюються в неглибоких ямах на стійких твердих основах (мармурових плитах чи металевих немагнітних дисках). Відстань між магнітометрами повинна бути не менша ніж 3 м. Якщо вимірювальна лабораторія облаштована на шасі автомобіля, то її розташовують на відстані 20 – 30 м від магнітометрів.

Магнітометри " H_x " і " H_y " орієнтують за допомогою знімальної бусолі з точністю до $\pm 0,5^\circ$ і за допомогою нівелювальних гвинтів виконують нівелювання за рівнем усіх трьох магнітометрів (включаючи магнітометр " H_z ").

Азимут магнітометра " H_x " повинен збігатися з азимутом осі x , а азимут магнітометра " H_y " – з азимутом осі y . Полярність магнітометрів перевіряють за покажчиками, вигравіруваними на їх корпусах – стрілка "+ y " магнітометра " H_x " повинна бути направлена в бік плюсового заземлення лінії " E_y ", а стрілка "+ x " магнітометра " H_y " – у бік плюсового заземлення лінії " E_x " (рис.7.4).

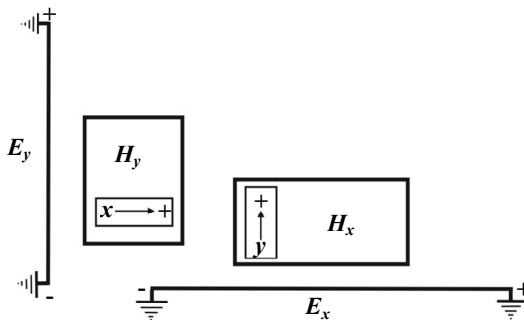


Рис. 7.4. Визначення полярності магнітометрів

Електричні лінії та магнітометри приєднуються до вхідної панелі магніотелуричної станції. Виконується налаштування й перевірка приймальних ліній та станції згідно з інструкцією по експлуатації. При нормальному функціонуванні системи оператор переводить станцію в режим реєстрації параметрів магніотелуричного поля. Час реєстрації визначається геологічним завданням і може складати від декількох годин до десятків годин.

Інтерпретація даних МТЗ. Інтерпретація даних магніотелуричних зондувань буває якісною та кількісною. На етапі *якісної інтерпретації* даних профільних МТЗ будуються *часові розрізи* модуля ефективного імпедансу $|Z_{ef}|$ та ефективного опору ρ_T , а також вертикальні *глибинні розрізи ізоліній* цих параметрів, при побудові яких ефективні глибини розраховуються за формулою:

$$h_{ef} = \sqrt{\rho_T / \omega \mu} \approx 356 \sqrt{T \cdot \rho_T} \text{ (м)}.$$

Методика побудови часових і вертикальних розрізів аналогічна побудові вертикальних карт ізоом ρ_{II} у методі ВЕЗ.

Часові та глибинні розрізи дозволяють виділити блоки порід із різними питомими опорами, установити напрямок падіння геоелектричних границь, зафіксувати наявність розломів (за присутністю на розрізах вузьких градієнтних зон) та оцінити розповсюдження їх на глибину. При площових роботах методом МТЗ на етапі якісної інтерпретації будуються карти типів амплітудних кривих МТЗ, карти координат екстремумів кривих та інші.

В арсеналі *кількісної інтерпретації* кривих МТЗ є ціла палітра традиційних способів: використання емпіричних зв'язків координат екстремумів кривих із параметрами горизонтів; визначення сумарної поздовжньої провідності S до високоомного горизонту та глибини H до поверхні низькоомного горизонту за лініями S і H ; кількісна палеткова та автоматизована інтерпретація методом підбору. Після кількісної інтерпретації кривих МТЗ будуються геоелектричні розрізи вздовж профілів спостережень, а при площових роботах – карти потужностей й опорів того чи іншого горизонту, глибин залягання опорних горизонтів, сумарної поздовжньої провідності S та ін.

На етапі кількісної інтерпретації велике значення має математичне моделювання МТ-полів у неоднорідних середовищах. Результати такого моделювання дозволяють підібрати (за експериментальними даними) параметри неоднорідностей і врахувати їх спотворювальний вплив на криві зондування.

На рис. 7.5 наведений приклад геофізичного розрізу за профілем, що перетинає Передкавказький прогин, а також криві МТЗ, за якими побудована поверхня фундаменту.

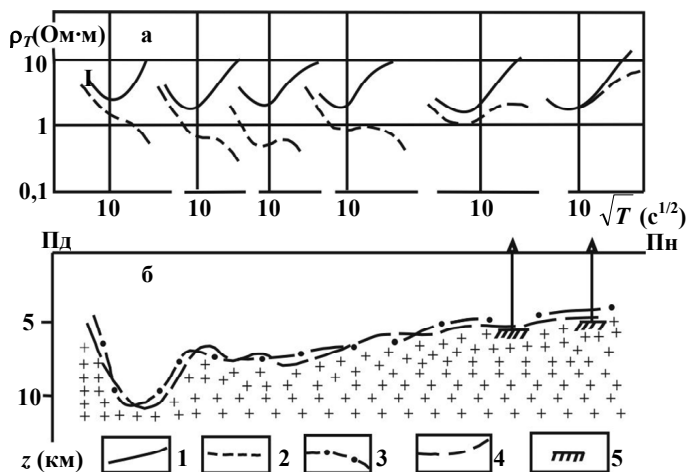


Рис. 7.5. Криві МТЗ (а) й геофізичний розріз (б) за профілем, що перетинає Передкавказький прогин:

1 – поздовжня крива ρ_T^{\parallel} ; 2 – поперечна крива ρ_T^{\perp} ; 3-5 – положення поверхні фундаменту за кривими ρ_T^{\parallel} , сейсморозвідкою та бурінням

Як видно з рисунка, поперечні криві ефективного опору ρ_T^{\perp} , розраховані за поперечним імпедансом $Z^{\perp} = E_y/H_x$, де напрямок x співпадає з простяганням прогину, спотворені так званим *крайовим гальванічним ефектом*, а результати кількісної інтерпретації поздовжніх кривих ρ_T^{\parallel} , розрахованих за поздовжнім імпедансом $Z^{\parallel} = E_x/H_y$, досить задовільно співпадають із даними сейсмічних досліджень та буріння.

Область застосування МТЗ. Магнітотелуричні зондування є основною модифікацією магнітотелуричних методів. Вони застосовуються при структурних дослідженнях у глибоких осадових басейнах, де потужність відкладів складає 3 – 10 км, а також для регіональних досліджень та вивчення глибинної електропровідності земної кори та верхньої мантії. Для вивчення глибинної будови Землі використовуються записи варіацій МТ-поля, отримані на опорних пунктах протягом декількох місяців. Вони забезпечують виділення спектральних складових із періодами від десятків секунд до годин і діб.

Застосування методу МТЗ на кристалічних масивах наштовхується на труднощі, пов'язані зі значними спотвореннями кривих МТЗ за рахунок впливу субвертикальних границь поділу. Разом з тим, як свідчить практика, дані МТЗ з успіхом можуть використовуватися для картування глибинних розломів, що розділяють різні геологічні блоки. Наявність розломів чітко проявляється на часових розрізах ефективного імпедансу у вигляді присутності на них високоградієнтних субвертикальних областей.

Завдання

1. Змонтувати приймальні електричні лінії для МТЗ розмірами 100 м відповідно до схеми (рис. 7.2).
2. Розкласти електричні лінії на місцевості в точці спостережень по двох взаємно перпендикулярних напрямках.
3. Встановити магнітометри в точці спостережень згідно з інструкцією по їх експлуатації.
4. Приєднати електричні лінії та магнітометри до вхідної панелі магнітотелуричної станції.
5. Перевірити параметри магнітотелуричної станції та каналів реєстрації згідно з інструкцією по експлуатації.
6. Перевести станцію в режим реєстрації параметрів магнітотелуричного поля.
7. Зробити записи параметрів магнітотелуричного поля протягом 3 годин і виконати їх спектральну обробку за допомогою програмного забезпечення магнітотелуричної лабораторії, за результатами якої розрахувати криві МТЗ.
8. Виконати кількісну інтерпретацію кривих МТЗ за допомогою програми IPI_МТ.
9. Побудувати часові розрізи модуля ефективного імпедансу $|Z_{ef}|$ та ефективного опору ρ_T , вертикальні глибинні розрізи ізоліній цих параметрів, геоелектричні розрізи вздовж профілів спостережень.
10. Дати коротке геологічне тлумачення отриманих результатів.

Після закінчення роботи бригада представляє наступні звітні матеріали: 1) файл даних; 2) часові розрізи модуля ефективного імпедансу $|Z_{ef}|$ та ефективного опору ρ_T ; 3) вертикальні глибинні розрізи ізоліній цих параметрів; 4) геоелектричні розрізи вздовж профілів спостережень; 5) короткий опис отриманих результатів.

7.2. Методи телуричних струмів та магнітотелуричного профілювання

Методи магнітотелуричних струмів (МТС) і магнітотелуричного профілювання (МТП) відносяться до модифікацій профілювання. У першому методі у відносно вузькому асимптотичному інтервалі періодів 10 – 100 с (інтервал S) синхронно реєструються варіації електричних компонент E_x , E_y телуричного поля на базисній (стаціонарній у радіусі 30 – 50 км) точці, на якій глибина до високоомної основи розрізу та його сумарна поздовжня провідність відомі, та одній або декількох рядових (польових) точках, рівномірно розташованих на площі робіт. За результатами обробки даних спостережень найчастіше визначається телуропараметр K : $K = E_{ef}^I / E_{ef}^B$, де E_{ef}^I та E_{ef}^B – ефективні (середні за період) значення напруженості електричного поля на польовій та базисній точках відповідно. Побудована карта цього телуропараметра якісно характеризує зміну сумарної поздовжньої провідності S надопорної частини розрізу (наявна обернено пропорційна залежність між S і K). Якщо сумарна поздовжня провідність на базисній точці S_B відома, карта телуропараметра K може бути перерахована в карту сумарної поздовжньої провідності площі робіт: $S = S_B / K$. При відомому в межах площі робіт значенні середнього поздовжнього опору геоелектричного розрізу ρ_l карта S може бути трансформована в структурну карту поверхні опорного шару за формулою $H = S \cdot \rho_l$.

У методі МТП, як і при виконанні МТЗ, реєструються варіації всіх п'яти компонентів електромагнітного поля (E_x , E_y , H_x , H_y , H_z), але в такому ж, як і в методі МТС, вузькому асимптотичному інтервалі періодів. За результатами аналізу експериментальних даних визначається ефективний імпеданс Z_{ef} та сумарна поздовжня провідність S надопорної частини геоелектричного розрізу. Для розрахунку S провідної товщини,

що перекриває поверхню картованого високоомного шару, може бути застосована так звана головна формула МТП, яка в різних системах одиниць має наступний вигляд:

- у системі СІ: $S = \frac{1}{|Z_{ef}|} - \sqrt{\frac{T}{4\pi\mu\rho_N}} \approx \frac{1}{|Z_{ef}|} - 796\sqrt{\frac{T}{10\rho_N}}$,
- в укрупненій практичній системі: $S = 796 \left[\frac{1}{|Z_{ef}|} - \sqrt{\frac{T}{10\rho_N}} \right]$,

де: ρ_N – кінцевий опір високоомного опорного горизонту, T – період коливаль.

Величини $796\sqrt{\frac{T}{10\rho_N}}$ і $\sqrt{\frac{T}{10\rho_N}}$, що входять у головні формули

МТП, записані в системах СІ та практичній відповідно, називаються поправкою Брюнеллі за кінцевий опір картованого горизонту. Безперечно, головна формула МТП може бути реалізована, якщо ρ_N відомий. Інформацію про ρ_N отримують на основі опорних МТЗ, що виконуються в незначних об'ємах, або ж за допомогою свердловинних досліджень.

За умови, що опорний картований горизонт є ізолятором ($\rho_N = \infty$), поправка Брюнеллі дорівнює нулю й головна формула МТП набуває досить простого вигляду:

- у системі СІ: $S = \frac{1}{|Z_{ef}|}$;
- в укрупненій практичній системі: $S = \frac{796}{|Z_{ef}|}$.

Головна формула МТП забезпечує задовільну точність визначення S в інтервалі періодів T , що суттєво перевищують T_{\min} – період мінімуму амплітудної кривої МТЗ перед її асимптотичною висхідною гілкою. Для визначення S в періоди T ,

близьких до T_{\min} , може бути використана додаткова формула МТП, яка в різних системах одиниць записується:

- у системі СІ:
$$S = \frac{1 + 0,45 \frac{T_{\min}}{T}}{|Z_{ef}|};$$
- в укрупненій практичній системі:
$$S = 796 \frac{1 + 0,45 \frac{T_{\min}}{T}}{|Z_{ef}|}.$$

Величина $0,45T_{\min}/T$, що входить у додаткову формулу МТП, носить назву поправки за кінцевий період. Для обчислення цієї поправки необхідна інформація про T_{\min} , яку отримують на основі опорних магніотелуричних зондувань.

Інколи в практиці магніотелуричних досліджень застосовується методика синхронної реєстрації варіацій як магнітного, так і телуричного полів на базисній і рядових точках. Така модифікація отримала назву комбінованого магніотелуричного профілювання (КМТП). При реалізації цієї модифікації, окрім телуропараметра K , визначається також і магнітний параметр N : $N = H_{ef}^{\Pi} / H_{ef}^B$. Відношення телуропараметра K до магнітного параметра N визначає відношення ефективних імпедансів на польовій і базисній точках: $K/N = Z_{ef}^{\Pi} / Z_{ef}^B$. Тоді, зважаючи на те, що в асимптотичному інтервалі періодів $Z_{ef}^{\Pi} / Z_{ef}^B = S_B / S_{\Pi}$, де S_{Π} і S_B – сумарні поздовжні провідності на польовій і базисній точках відповідно, а також на відоме значення S_B на базисній точці, можна визначити сумарну поздовжню провідність на польовій точці:

$$S_{\Pi} = \frac{N}{K} S_B.$$

Отже результатом робіт методами МТС і МТП (КМТП) є карти сумарної поздовжньої провідності та структурні карти глибин до поверхонь високоомних горизонтів. Методи МТС та МТП характеризуються значно вищою продуктивністю, ніж метод МТЗ. При їх виконанні обов'язковою є постановка в

незначних об'ємах опорних магнітотелуричних зондувань для визначення як асимптотичного інтервалу періодів, в межах якого необхідно виконувати дослідження, так й узагальнених параметрів розрізу на опорних базисних точках. Методи можуть застосовуватися для вивчення рельєфу поверхні високоомних порід (кристалічного фундаменту, хомогенних відкладів та ін.), особливо за умови неглибокого (2 – 3 км) їх залягання. На щитах метод МТП може застосовуватися для вивчення їх глибинної блоково-розломної тектоніки. Масштаби зйомок цими методами різноманітні – від крупно- до дрібномасштабних (від 1:5000 до 1:1 000 000).

8. НИЗЬКОЧАСТОТНІ МЕТОДИ ЕЛЕКТРОРОЗВІДКИ З КОНТРОЛЬОВАНИМИ ДЖЕРЕЛАМИ

До даної групи методів електророзвідки відносяться методи, що ґрунтуються на вимірах низькочастотних електромагнітних полів ($f < 10$ кГц) штучних джерел. Теоретичні оцінки та експериментальні дослідження свідчать, що у вказаному частотному діапазоні електромагнітні поля в реальних середовищах відносяться до класу *квазістаціонарних*. На їх просторову структуру будуть впливати, перш за все, такі електромагнітні властивості гірських порід як питомий електричний опір ρ та магнітна проникність μ . Оскільки більшість гірських порід немагнітні, то визначальна роль належить, безперечно, питомому опору.

8.1. Частотні електромагнітні зондування

Частотні електромагнітні зондування (ЧЗ, ЧЕМЗ), як і метод МТЗ відносяться до зондувань, що використовують індукційний принцип, що ґрунтується на явищі скін-ефекту. На відміну від МТЗ у ЧЗ вимірюються не природні, а штучні гармонійні електромагнітні поля, які створюються контрольованими (штучними) джерелами. Виміри цих полів виконуються в *дальній зоні* джерел збудження на відстанях r , що значно перевершують довжину електромагнітної хвилі λ у провідному середовищі $r/\lambda \gg 1$ або $|kr| \gg 1$, де k – комплексне хвильове число (див. п. 2.2.1).

Вибір умови дальньої зони для реєстрації полів у методі ЧЗ продиктований тим, що в ближній зоні ($r/\lambda \ll 1$ або $|kr| \ll 1$) первинні поля джерел збудження значно переважають вторинні індукційні поля, які власне й забезпечують можливість індукційного зондування. У дальній зоні ситуація змінюється на користь вторинних індукційних полів, структура яких є близькою до структури плоского електромагнітного поля (п. 2.2.2) – моделі поля, прийнятої в методі МТЗ.

При проведенні польових робіт методом ЧЗ застосовують різні установки, за допомогою яких виконують багаточастотні виміри ефективного опору ρ_ω . Для цього на кожній фіксованій частоті в живильний контур пропускають гармонійний струм I й за допомогою приймального контуру вимірюють інформативний сигнал ΔU . За результатами вимірів ΔU та I розраховують ефективний опір за відомою формулою дальньої зони:

$$\rho_\omega = K |\Delta U| / I,$$

де K – коефіцієнт установки.

Інколи при виконанні ЧЗ вимірюють також зсув фази $\Delta\varphi_\omega$ сигналу ΔU щодо фази струму в живильному контурі.

Частотність вимірів необхідна для отримання зондувальних кривих ЧЗ – амплітудної $\rho_\omega = \rho_\omega(\sqrt{T})$ та фазової $\Delta\varphi_\omega = \Delta\varphi_\omega(\sqrt{T})$, подібних до амплітудної та фазової кривих МТЗ.

Установки, що використовуються в методі ЧЗ, відрізняються за способом збудження поля й вимірюваними параметрами. Найбільш доцільно використовувати наступні установки:

Установка "диполь-диполь". У цій установці живильним контуром є заземлений диполь AB , а приймальним – заземлений диполь MN , за допомогою якого вимірюються, залежно від полярного кута φ установки (див. п. 2.1.1), різні компоненти електричного поля: паралельна $\Delta U_x = MN \cdot E_x$, екваторіальна $\Delta U_{екв} = MN \cdot E_{екв}$ ($70^\circ < \varphi < 110^\circ$), осьова $\Delta U_{ос} = MN \cdot E_{ос}$ ($-15^\circ < \varphi < 15^\circ$). Формули розрахунку коефіцієнтів для різних модифікацій установок "диполь-диполь" наступні:

$$K_x = 2\pi r^3 / [AB \cdot MN (3 \cos^2 \varphi - 2)];$$

$$K_{екв} = \pi r^3 / (AB \cdot MN); \quad K_{ос} = 2\pi r^3 / (AB \cdot MN).$$

Установка "диполь-петля". У даній установці живильним контуром є заземлений електричний диполь AB , а вимірювальним – вертикальний магнітний диполь. Приймальний вертикальний магнітний диполь являє собою горизонтальну петлю з кількістю витків n_{Π} і площею одного витка q_{Π} .

У контурі такої вимірювальної петлі індукується сигнал ΔU_z , амплітуда якого виражається:

$$\Delta U_z = \varepsilon_z(\omega) = \omega \mu Q_{II} H_z(\omega),$$

де ω – кругова частота гармонійних коливань, $\mu = 4\pi \cdot 10^{-7}$ Гн/м – абсолютна магнітна проникність вакууму, $Q_{II} = q_{II} n_{II}$ – ефективна площа приймальної петлі, $H_z(\omega)$ – вертикальна компонента напруженості магнітного поля.

Коефіцієнт K_z такої установки при розрахунку ефективного опору ρ_ω визначається за наступною формулою:

$$K_z = 2\pi r^4 / (3ABQ_{II} \sin \phi),$$

де ϕ – полярний кут установки (кут між віссю диполя AB і радіусом r на точку виміру).

Установка "петля-диполь". Живильним контуром у цій установці є вертикальний магнітний диполь (горизонтальна петля площею q_G і кількістю витків n_G), приймальним – заземлений диполь MN , який вимірює азимутальну складову електричного поля $\Delta U_\phi^* = E^* \cdot MN$. Коефіцієнт такої установки визначається за наступним співвідношенням:

$$K_\phi^* = 2\pi r^4 / (3Q_G MN),$$

де $Q_G = q_G n_G$ – ефективна площа генераторної петлі.

Примітка: У наведених виразах символом "зірочка" підкреслюється, що для збудження електромагнітного поля застосовується джерело магнітного типу – магнітний диполь. Необхідно відмітити, що установка "петля-диполь" і установка "диполь-петля", згідно з принципом взаємності, є тотожними щодо результатів дослідження.

Установка "петля-петля". Живильним і приймальним контурами в цій установці є вертикальні магнітні диполі. Коефіцієнт цієї установки можна подати у вигляді:

$$K_z^* = 2\pi r^5 / (9Q_{II} Q_G).$$

Необхідно відмітити, що частіше при виконанні частотних електромагнітних зондувань використовуються установки, в яких збуджувальним диполем є електричний диполь. При такому збудженні геометричне згасання електромагнітного поля на порядок менше, ніж в установках із магнітним збудженням, отже вони можуть забезпечити більш глибокі дослідження геоелектричних розрізів. Установки зі збудженням електромагнітного поля магнітним диполем можуть застосовуватися для виконання щодо неглибоких зондувань в умовах, коли облаштування гальванічних заземлень суттєво ускладнене.

Аналіз аналітичних розв'язків прямих задач ЧЗ і результатів теоретичних розрахунків дозволяють прийти до наступних висновків щодо амплітудних кривих ЧЗ – кривих ефективного опору $\rho_{\omega}(\sqrt{T})$ для горизонтально-шарового розрізу:

1. Високочастотною асимптотою ($\omega \rightarrow \infty$) амплітудних кривих частотних зондувань є значення дійсного питомого опору першого горизонту ρ_1 . Вихід кривих ρ_{ω} на асимптоту ρ_1 відбувається з осциляцією ρ_{ω} навколо ρ_1 (подібно до кривих МТЗ).

2. Хвильові криві частотних зондувань (криві для установок із нескінченим розносом $r \rightarrow \infty$) не залежать від типу установок.

3. Для розрізів із провідною основою ($\rho_N \neq \infty$) хвильові криві ЧЗ ідентичні кривим МТЗ. Для розрізів із непровідною основою ($\rho_N = \infty$) хвильові криві ЧЗ відрізняються від кривих МТЗ через інтерференції індукційних збуджень, спричинених двома магнітними хвилями – повітряною магнітною хвилею й хвилею, що розповсюджується по непровідній основі розрізу.

4. Хвильові криві ефективного опору ρ_{ω} для розрізу, основою якого є ізолятор ($\rho_N = \infty$), мають низькочастотну асимптоту S ($S \square$ сумарна поздовжня провідність розрізу), рівняння якої:

$$\rho_{\omega} \Big|_{\substack{\omega \rightarrow 0 \\ \rho_N = \infty}} = 2 / (\omega \mu S^2) = (\sqrt{T})^2 / (\pi \mu S^2).$$

Графічним зображенням асимптоти S у логарифмічному масштабі є пряма лінія, нахилена під кутом $\arctg 2 = 63^{\circ}25'$ до осі абсцис. За лінією S експериментальної кривої частотних зонду-

вань можна визначити сумарну поздовжню провідність розрізу: $S = \sqrt{T}/(\pi\mu\rho_\omega)$, де ρ_ω і \sqrt{T} – ордината й абсциса довільної точки, розташованої на асимптоті. Асимптота S амплітудних кривих частотних зондувань у два рази відрізняється від асимптоти S амплітудних кривих МТЗ.

5. Збільшення розносу установки приводить до розширення інтервалу періодів T хвильової стадії індукційного процесу (інтервалу періодів, на якому реальні криві ЧЗ співпадають із хвильовими кривими). Таким чином, збільшення розносу установок приводить до збільшення глибинності частотних індукційних електромагнітних зондувань.

6. Для установок "диполь-петля" (чи "петля-диполь") та "петля-петля" низькочастотний асимптотичний інтервал періодів ($\omega \rightarrow 0$) є неінформативним. Рівняння низькочастотних асимптот амплітудних кривих ЧЗ не містять інформації про електричні властивості розрізу і мають вигляд:

а) установка "диполь-петля": $\rho_\omega|_{\omega \rightarrow 0} = \pi\mu r^2/(3T)$;

б) установка "петля-петля": $\rho_\omega|_{\omega \rightarrow 0} = \pi\mu r^2/(9T)$.

Графічне зображення неінформативних низькочастотних асимптот кривих ρ_ω у логарифмічному масштабі має вигляд низхідних прямих ліній, нахилених під кутом $\arctg(-2) = -63^\circ 25'$ до вісі абсцис.

7. Низькочастотними асимптотами амплітудних кривих ЧЗ для установок "диполь-диполь" є ординати ρ_ω , числові значення яких визначаються стаціонарним електричним полем диполя на поверхні горизонтально-шарового розрізу.

8. Кривим ЧЗ властива еквівалентність, аналогічна еквівалентності кривих МТЗ: для кривих типу H і $A - S_2$ -еквівалентність, для кривих типу K, Q – еквівалентність по h_2 .

На рис. 8.1, як приклад, наведені палеткові чотиришарові амплітудні криві ЧЗ типу KH для установки "диполь-петля" (палеткові криві ЧЗ будуються в такому ж безрозмірному зображенні, як і криві МТЗ). Вони ілюструють висновки щодо амплітудних кривих, сформульовані в пунктах 1 – 6. Окрім того, розгляд кривих показує, що наявність проміжного непровідного екрана $\rho_2 = \infty$ не перешкоджає електромагнітному зондуванню заекранованих товщин.

Методика виконання частотних зондувань визначається, перш за все, необхідною глибинністю досліджень. Оптимальний рознос r установки, який забезпечує виконання умови дальньої зони, повинен бути в 5 – 6 разів більшим від проектованої глибини досліджень H . Максимальна частота в герцах може бути оцінена за співвідношенням $f_{\max} \approx \rho/h^2$, де ρ – середній питомий опір верхньої частини розрізу, h – середня оцінювальна потужність верхньої частини розрізу в кілометрах. Мінімальна робоча частота повинна бути в 100 – 1000 разів меншою від максимальної.

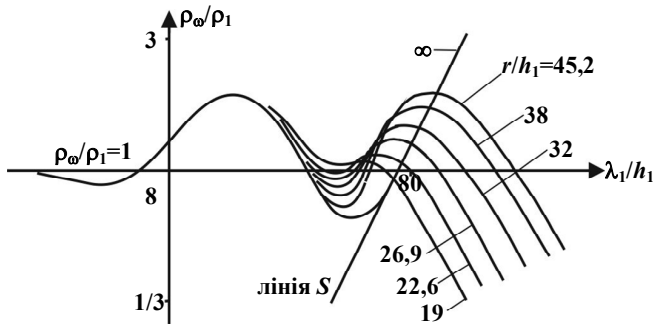


Рис. 8.1. Чотиришарові амплітудні криві частотного зондування типу KH для магнітного поля заземленого диполя при $\rho_2 = \infty$, $\rho_3 = 1/4 \rho_1$, $\rho_4 = \infty$, $h_2 = h_3 = 2h_1$: λ_1 – довжина хвилі в першому горизонті

Точка запису в ЧЗ належать до центра розносу r . При нахиленому заляганні шарів розрізу необхідно проводити зустрічні зондування (положення живильного й приймального диполів міняються місцями). Середні значення ефективних опорів ρ_ω і зсуву фаз $\Delta\phi_\omega$ належать до центра r . Розміри диполів AB і MN повинні бути меншими $\frac{1}{3}r$, а сумарна площа приймальної петлі – біля $0,5 - 1 \text{ км}^2$. Зондування починають із максимальної частоти. Кожна наступна частота в $1,5 - 2$ рази менша від попередньої.

Після виконання зондувань будуються амплітудна й фазова криві ЧЗ. Амплітудні криві ефективного опору ρ_ω будуються на логарифмічних бланках: по горизонталі відкладається $\sqrt{T} = 1/\sqrt{f}$,

а по вертикалі ρ_{ω} . Фазові криві будуються на на-півлогарифмічних бланках – по вертикалі відкладаються кути в арифметичному масштабі – в 1 см 10° , а по горизонталі – у логарифмічному масштабі \sqrt{T} . Амплітудні й фазові криві ЧЗ є основними вихідними експериментальними даними, які підлягають інтерпретації, при цьому основне значення мають криві ρ_{ω} .

Як відмічалось вище, при наявності в основі розрізу непровідного опорного горизонту ($\rho_N = \infty$) *хвильові криві ЧЗ* мають асимптоту S , по якій визначається сумарна поздовжня провідність надопорної частини геоелектричного розрізу. Зважаючи на те, що в наведеній вище формулі для розрахунку S абсолютна магнітна проникність вакууму μ є величиною визначеною ($\mu = 4\pi \cdot 10^{-7}$ Гн/м), цю формулу можна записати у вигляді:

$$S \approx 503 \sqrt{T} / \sqrt{\rho_{\omega}} .$$

Для визначення сумарної поздовжньої провідності геоелектричного розрізу S необхідно на логарифмічний бланк, на якому зображена експериментальна крива ЧЗ, перенести лінію S теоретичної кривої, що збіглась з експериментальною, узяти на перенесеній лінії S довільну точку, визначити її координати й підставити в наведену вище формулу.

Способи інтерпретації кривих ЧЗ та способи зображення даних практично аналогічні способам інтерпретації кривих і побудовам, що застосовуються в методі МТЗ. За результатами інтерпретації будуються геоелектричні розрізи, карти сумарної провідності до поверхні опорного горизонту, структурні карти та ін.

Частотні електромагнітні зондування *застосовуються* при вирішенні наступних задач: 1) регіональному картуванні для оцінки основних рис тектоніки осадочних басейнів, зокрема визначення глибини залягання високоомного фундаменту; 2) структурних дослідженнях, перш за все на нафту та газ; 3) великомасштабному картуванні й вивченні розрізів на невеликій глибині; 4) вирішенні деяких інженерно-геологічних задач та пошуках підземних вод.

8.2. Метод зондування становленням поля

Метод зондування становленням поля (ЗС, ЗСП) відноситься до категорії індукційних зондувань (як і методи МТЗ та ЧЗ). Він заснований на реєстрації процесів становлення поля (*перехідних процесів*) індукційної природи, які виникають у провідному середовищі при стрибкоподібній зміні первинного збуджувального поля (при миттєвій комутації струму в живильному контурі джерела збудження). Для збудження й реєстрації перехідних процесів можуть застосовуватися установки тих типів, що і в методі частотних електромагнітних зондувань. Зондувальним параметром у методі ЗС є час t , оскільки з його плином збільшується глибинність розповсюдження електромагнітного поля, індукованого в провідному середовищі, а отже й глибинність досліджень.

При електрометричних дослідженнях методом становлення поля з принципової точки зору є дві основні його модифікації: *метод становлення поля в дальній зоні* (ЗСДЗ або ЗСД) та *метод становлення поля в ближній зоні* (ЗСБЗ або ЗСБ). Безперечно, що в рамках цих принципово різних двох модифікацій можливі певні їх варіації, як то зондування становленням поля із закріпленим джерелом (ЗС-ЗД) та зондування в ближній зоні за методикою спільної глибинної точки (ЗСБ-СГТ).

8.2.1. Зондування становленням поля в дальній зоні

Модифікація зондувань становленням поля в дальній зоні (ЗСД) є спорідненою методу ЧЗ. У ній використовуються ті ж установки, що й в методі частотних зондувань. Обов'язковою вимогою в цій модифікації електромагнітних зондувань є та, що реєстрація неусталених полів повинна виконуватися в дальній зоні джерела збудження (відстань r до точки реєстрації в 5 – 6 разів більша за проєктовану глибину досліджень).

Збудження поля здійснюється шляхом подачі серії прямокутних імпульсів струму в заземлену лінію AB або незаземлену петлю. Тривалість як самих імпульсів струму, так і пауз між ними повинна бути достатньою для повного усталення поля.

При збудженні перехідних процесів застосовують різні режими генерування імпульсів струму: режим однополярних імпульсів, режим різнополярних імпульсів і режим подвоєння – інверсний режим, при якому струм не вимикається, а лише змінюється його полярність. Останній режим забезпечує підсилення інформативних сигналів у два рази. Багатократний імпульсний режим збудження й реєстрації дозволяє виконувати накопичення інформативних сигналів (або апаратурне, або в процесі обробки даних) для боротьби із завадами та покращення співвідношення "сигнал-завада".

Зареєстровані імпульси становлення поля $\Delta U(t)$ (як правило осереднені в процесі накопичення) трансформуються в криві зондування (*криві ефективного опору* ρ_τ) за допомогою універсальної формули дальньої зони*: $\rho_\tau = K \cdot \Delta U(t) / I$, де I – стрибок сили струму в живильному контурі; K – коефіцієнт установки (коефіцієнти установок в методі ЗСДЗ такі ж як і в методі ЧЗ). Питомий опір, визначений за формулою дальньої зони, у випадку однорідного півпростору буде рівним дійсному питомому опору цього півпростору, а у випадку неоднорідного середовища – деякому позірному (ефективному) опору.

* Примітка. Формула дальньої зони впливає з аналізу ранньої ($t \rightarrow 0$) стадії перехідного процесу для моделі однорідного півпростору.

Найбільш часто для виконання електрометричних зондувань у дальній зоні застосовують установки "диполь-петля" та "диполь-диполь". При застосуванні установки "диполь-петля" збудження перехідного процесу виконується електричним диполем (заземленою лінією AB), а реєстрація – індукційною незаземленою петлею, сигнал в якій $\varepsilon(t)$ пропорційний часовій похідній вертикальної компоненти магнітної індукції $\partial B_z / \partial t$:

$$\varepsilon(t) = -Q_{\Pi} \frac{\partial B_z}{\partial t},$$

де Q_{Π} – ефективна площа приймальної індукційної петлі. Така модифікація методу ЗС має абревіатуру ЗСМ.

При застосуванні установки "диполь-диполь" збудження перехідного процесу і його реєстрація виконується електричними диполями – заземленими лініями AB й MN відповідно. Отже, у цьому випадку реєструється перехідний процес електричної

складової електромагнітного поля. Ця модифікація методу ЗС позначається ЗСЕ.

У результаті трансформації сигналів перехідних процесів згідно з формулою дальньої зони: $\rho_\tau = K\Delta U(t)/I$ – на подвійних логарифмічних бланках будуються криві зондування становлення поля: уздовж горизонтальної осі відкладають $\sqrt{2\pi t}$ ($c^{1/2}$), уздовж вертикальної – ρ_τ (Ом·м). Криві ЗСДЗ являють собою, фактично, сам зареєстрований сигнал, побудований у логарифмічному масштабі, але зі зміненою метрикою (замість вольт, ми маємо Ом·м). Криві ефективного опору $\rho_\tau(\sqrt{2\pi t})$ є основною вихідною інформацією для інтерпретації даних ЗСДЗ.

Теоретичні (палеткові) криві ефективного опору, розраховані для горизонтально-шарових розрізів, також будуються на логарифмічних бланках: уздовж вертикальної осі відкладаються значення відносного ефективного опору ρ_τ/ρ_1 , уздовж горизонтальної – безрозмірного часового параметра $\tau_1/h_1 = \sqrt{10^7 \rho_1 2\pi t}/h_1$, де h_1 і ρ_1 – товщина та питомий опір першого шару. Виконуючи формальне порівняння зображень теоретичних кривих ЧЗ та теоретичних кривих ЗС, приходимо до висновку, що параметр $\tau_1 = \sqrt{10^7 \rho_1 2\pi t}$ є аналогом довжини хвилі в першому горизонті для неусталених електромагнітних полів.

На рис. 8.2 наведений приклад тришарових кривих ЗСМ і ЗСЕ типу H , де видно чітке відображення структури геоелектричного розрізу в ранній (хвильовій) стадії перехідного процесу.

Аналіз розв'язків прямих задач методу становлення поля свідчить про те, що особливості кривих ρ_τ у дальній зоні подібні до особливостей амплітудних кривих ЧЗ і зводяться до наступного:

1. На асимптотичному ранньому часі перехідних процесів ($t \rightarrow 0$) крива ефективного опору ρ_τ виходить на горизонтальну асимптоту, якою є значення дійсного питомого опору першого горизонту ρ_1 : $\rho_\tau|_{t \rightarrow 0} = \rho_1$.

2. *Хвильові криві* ефективного опору (криві для установок з нескінченно великим розносом $r \rightarrow \infty$) не залежать від типу установок, а визначаються лише структурою геоелектричного розрізу.

3. У виразі збільшення розносу установки розширюється завдяки інтервалу часу t *хвильової стадії* перехідного процесу – стадії, де крива ρ_τ реальної установки практично співпадає з хвильовою кривою.

4. Для розрізів з ізолювальною основою ($\rho_N = \infty$) хвильова крива ρ_τ має *асимптоту* S , рівняння якої:

$$\rho_\tau = 2t / (\mu S^2) = (\sqrt{2\pi t})^2 / (\pi \mu S^2).$$

Графічним зображенням асимптоти в логарифмічному масштабі є пряма лінія (на рис. 8.2 це "лінія S "), нахилена під кутом $\arctg 2 = 63^\circ 25'$ до осі абсцис. За цією асимптотою можна визначити сумарну провідність розрізу S до опорного високоомного горизонту:

$$S = \sqrt{2t / \mu \rho_\tau} \approx 503 \sqrt{2\pi t} / \sqrt{\rho_\tau}.$$

5. У *пізній стадії* перехідного процесу ($t \rightarrow \infty$), яка задовольняє умові ближньої зони $\tau_1/r \gg 1$, індукційне поле, зумовлене збудженням другого роду (п. 2.3), рівномірно розподіляється в межах надопорної провідної частини розрізу й залежить тільки від його сумарної провідності S . Рівняння пізньої асимптоти кривої ρ_τ для установки "диполь-петля" має вигляд:

$$\rho_\tau = r^5 \mu^4 S^3 / (16t^4).$$

Графічним зображенням цієї асимптоти в логарифмічному масштабі є низхідна пряма лінія, нахилена до горизонтальної осі $\sqrt{2\pi t}$ під кутом $\arctg(-8) = -83^\circ$ (зображені на рис. 8.2,а теоретичні криві ефективного опору ще далекі від досягнення пізньої асимптоти). За цією асимптотою можна також визначити S розрізу. Асимптотами кривих ρ_τ для установок "диполь-диполь" є ординати, значення яких залежать від рівня стаціонарного електричного поля диполя на поверхні горизонтально-шарового розрізу (рис. 8.2,б).

У методі ЗСДЗ в основному аналізується *рання (хвильова) стадія* перехідного процесу, при цьому інформація, як і в методі частотного зондування, відноситься до центра розносу r – **від-стані** між джерелом поля й точкою виміру.

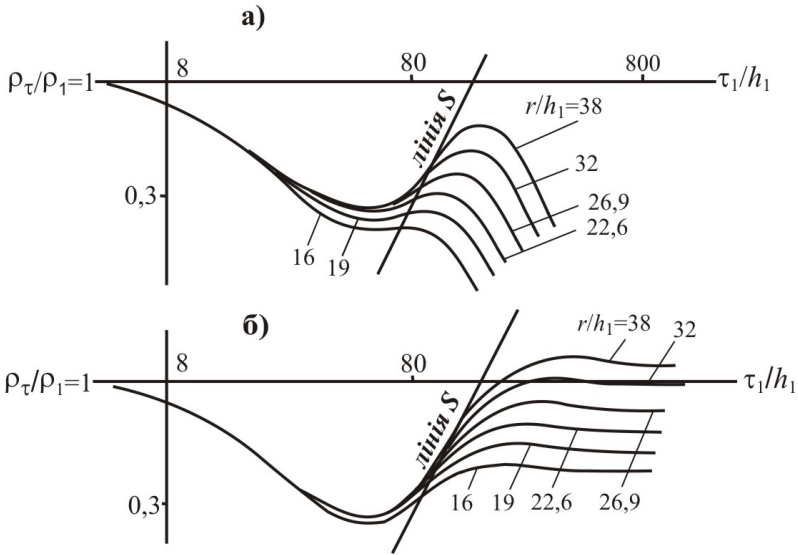


Рис. 8.2. Тришарові криві зондувань становленням поля заземленого диполя в дальній зоні для $\rho_2=1/4\rho_1$, $h_2=4h_1$, $\rho_3=\infty$:
 а) – вертикальне магнітне поле; б) – екваторіальна компонента електричного поля

Хвильова стадія кривої ρ_τ підлягає як *якісній*, так і *кількісній інтерпретації*. Якісна інтерпретація зводиться до різних геоелектричних побудов, таких як часові розрізи ефективних опорів ρ_τ уздовж профілю спостережень, вертикальні розрізи ефективних опорів (карти ізоліній ρ_τ у вертикальній площині, що перетинає профіль), карти ρ_τ для фіксованого часу, побудовані в горизонтальній площині (при площових роботах), карти ρ_τ для фіксованих ефективних глибин дослідження і т. ін.

У процесі якісної інтерпретації при глибинних побудовах вертикальних розрізів і площових карт ρ_τ ефективні глибини дослідження для кожного фіксованого часу t розраховують за формулою: $h_{ef} = \alpha\sqrt{t\rho_\tau}$ [км], де α – емпіричний коефіцієнт, який бажано визначити за результатом параметричних зондувань. Часто $\alpha \approx 1 - 1,5$.

Для підвищення роздільної здатності якісної інтерпретації можна застосовувати до кривих ρ_τ наступну диференціальну трансформацію:

$$\rho_{in}(t) = \rho_\tau(t) \cdot \frac{1 + \frac{t}{\rho_\tau} \cdot \frac{\partial \rho_\tau}{\partial t}}{1 - \frac{t}{\rho_\tau} \cdot \frac{\partial \rho_\tau}{\partial t}} = \rho_\tau(t) \cdot \frac{1 + \frac{\partial(\ln \rho_\tau)}{\partial(\ln t)}}{1 - \frac{\partial(\ln \rho_\tau)}{\partial(\ln t)}},$$

де ρ_{in} – ефективний інтервальний опір. На основі кривих ρ_{in} можна виконувати ті ж побудови, що і на основі кривих ρ_τ .

Кількісна інтерпретація кривих ЗСДЗ виконується за допомогою палеток. Нині завдяки вдалим алгоритмічним та програмним розробкам, виконаним у Сибірському відділенні РАН, усе частіше використовують комп'ютерну інтерпретацію в інтерактивному режимі за допомогою спеціальних програм.

Зондування ЗСДЗ застосовують при вирішенні наступних задач:

- 1) глибинних дослідженнях (до глибин 10 км);
- 2) регіональному картуванні для вивчення загальних рис тектоніки осадових басейнів і пошуків структур;
- 3) картуванні поверхні фундаменту й вивченні високоомних екранувальних горизонтів;
- 4) виділенні зон розвитку провідних теригенних комплексів в осадовому чохлі та літологічному розчленуванні осадових порід.

Метод ЗСДЗ широко використовувався у 60 – 70-і роки минулого сторіччя при регіональному геологічному вивченні території колишнього Радянського Союзу. Нині частіше застосовується метод зондування становленням поля в ближній зоні.

8.2.2. Зондування становленням поля в ближній зоні

Метод зондування становленням поля в ближній зоні (ЗСБ, ЗСБЗ) широко використовується при вирішенні не тільки структурних, але й рудних задач. У рудному варіанті він отримав назву зондування методом перехідних процесів (ЗМПП), хоча фізична основа методів ЗСБ і ЗМПП залишається однаковою, як і методика обробки та аналізу експериментальних даних.

При зондуванні становленням поля в ближній зоні рознос r установки (як правило, це установки з індукційним датчиком – незаземленою приймальною петлею) вибирається в 1,5 – 3 рази меншим проєктованих глибин досліджень. Для однорідного півпростору з питомим опором ρ умова ближньої зони суворо виконується при $\sqrt{2\pi\rho}10^7/r > 16$. Отже ця умова може бути виконана на пізніх часах перехідного процесу й на малих розносах r .

При зменшенні розносу установок r ліва межа часового інтервалу ближньої зони зміщується в напрямку зменшення часу t . Безперечно, що зменшення розносу розширює інформативний часовий інтервал ближньої зони й підвищує локальність отримуваної інформації у зв'язку з покращенням визначеності точки запису. Але з іншого боку зменшення розносу приводить до зростання швидкості усталення поля і втрати візуальної інформаційної виразності сигналу. Відтак амплітудний рівень інформативного сигналу в інтервалі часу, що забезпечує необхідну глибинність досліджень, зменшується, що спонукає до підвищення потужності джерел збудження поля. З огляду на приведені міркування та у зв'язку з обмеженістю потужності джерел живлення й чутливості реєструвальної апаратури зменшення розносу установок ЗСБЗ повинно бути також обмеженим. Практичні дослідження показали оптимальність вибору розносу r у вказаних вище межах.

У методі ЗСБЗ широко використовуються установки "диполь-петля" ("заземлена лінія – петля") та установки з генераторною квадратною (значно рідше круглою) петлею, усередині якої виконуються виміри перехідного процесу. Серед установок з магнітним збудженням перехідних процесів розрізняють наступні:

1. *Співвісна установка "петля в петлі"* – установка, яка складається з генераторної квадратної петлі з розміром сторони квадрата L та приймальної петлі (як правило, багатовиткової) менших розмірів, розташованої в центрі генераторної.

2. *Суміщена установка* – установка, в якій генераторний і приймальний контури петлі суміщені, тобто контур приймальної петлі повторює контур генераторної.

3. *Однопетльова установка* – установка, яка складається з однієї петлі: при увімкненні струму петля працює як генераторна, а після вимкнення струму автоматично перемикається на вимірювальний канал і працює як приймальний контур.

Усі установки з магнітним збудженням є співвісними, а отже симетричними щодо їх центра (вісесиметричними). Практичне застосування цих установок вирішує повністю проблему точки запису, яка існує для установки "диполь-петля". У цьому їх значна перевага перед останньою. У модифікації ЗМПП знайшли застосування виключно петльові співвісні установки. З нашої точки зору, найбільш прийнятною для використання (перш за все з принципових міркувань) є співвісна установка "петля в петлі".

При використанні установок гальванічного типу "диполь-диполь" (особливо паралельних) можуть викликати певні ускладнення, зумовлені дією полів викликані поляризації, які можуть, як свідчить практика, особливо відчутно проявлятися в пізній стадії перехідного процесу. Відділити їх від індукційних процесів практично досить складно.

У методі ЗСБЗ перехідні процеси ресструються в більшості після вимикання електричного струму, тобто в паузах між його імпульсами, оскільки генераторна петля працює в імпульсному режимі, з метою накопичення інформативних сигналів для покращення співвідношення "сигнал-завада". Частота імпульсів повинна бути такою, щоб протягом півперіоду перехідний процес повністю відбувся. Застосування сучасної цифрової вимірювальної техніки дозволяє виконувати накопичення інформативних сигналів безпосередньо апаратним способом або ж у процесі комп'ютерної обробки отриманих цифрових записів.

Точки ЗСБЗ відпрацьовуються вздовж профілів, орієнтованих поперек простягання основних структурних елементів району досліджень. При площових зйомках задається система профілів. За центр зондування приймається центр установки "диполь-петля" (піврознос установки $r/2$) або ж центр співвісних петльових установок. Відстань між сусідніми точками бажано вибирати рівною розносу установки або радіусу чи половині розміру генераторної петлі. Ця відстань не повинна перевищувати максимальну глибину досліджень.

Обробка інформативних польових імпульсів $\varepsilon(t)$ полягає в їх трансформації в криві зондувань (аналогічно методу ЗСДЗ). Застосовують два види трансформації сигналів $\varepsilon(t)$ – у криві ефективного опору $\rho_{\tau}(t)$ й у криві залежності ефективної поздо-

вжньої провідності S_τ від ефективної глибини дослідження H_τ [18]. На сучасному етапі обробка сигналів (накопичення, фільтрація) та їх трансформації практично всюди виконуються на персональних комп'ютерах.

Трансформація сигналів перехідних процесів $\varepsilon(t)$ у криві ефективного опору $\rho_\tau(t)$. Дана трансформація реалізується за формулою ближньої зони, яка впливає з аналізу пізньої стадії перехідного процесу для моделі однорідного півпростору й має вигляд:

$$\rho_\tau = \left[K_{БЗ} \cdot \frac{1}{t^{5/2}} \frac{I}{\varepsilon(t)} \right]^{2/3},$$

де $K_{БЗ}$ – коефіцієнти установок у ближній зоні. Для установки "диполь-петля" цей коефіцієнт має вигляд:

$$K_{БЗ} = ABQ_{П}r\mu^{5/2} \sin \varphi / (40\pi^{3/2}),$$

де: AB – розмір електричного диполя, r – рознос установки, φ – полярний кут установки, $Q_{П}$ – ефективна площа приймальної петлі, $\mu = 4\pi \cdot 10^{-7}$ Гн/м – магнітна проникність вакууму.

Для всіх відмічених вище співвісних установок, в яких перехідні процеси збуджуються незаземленою петлею, коефіцієнти однакові й мають наступний вигляд:

$$K_{БЗ} = Q_{Г}Q_{П}\mu^{5/2} / (20\pi^{3/2}),$$

де $Q_{Г}$ – ефективна площа генераторної петлі. Зрозуміло, що у випадку однопетльової установи площа генераторної та приймальної петлі однакова.

Криві ефективного опору, як експериментальні, так і теоретичні, розраховані для горизонтально-шарових моделей розрізу, будуються на логарифмічних бланках подібно до кривих ρ_τ у методі зондування становленням поля в дальній зоні, тобто $\rho_\tau = f(\sqrt{2\pi t})$ і $\rho_\tau/\rho_1 = f(\tau_1/h_1)$ відповідно. На рис. 8.3 показані теоретичні тришарові криві ефективного опору ЗСБЗ типу H для установки "диполь-петля". Із приведеного рисунка видно,

що зі зменшенням розносу установки криві ρ_τ наближаються до "ідеальної" кривої ближньої зони – кривої, отриманої при нульовому ($r = 0$) розносі установки.

На ранній стадії перехідного процесу ($t \rightarrow 0$), де не виконується умова ближньої зони, криві ρ_τ виходять на візуально неінформативну асимптоту. Аналітичне дослідження кривих ρ_τ дозволяє записати рівняння цієї асимптоти в абсолютній метриці у вигляді:

$$\rho_\tau = \left[2r^{10/3} \mu^{5/3} \pi^{4/3} / (30\rho_1)^{2/3} \right] / (\sqrt{2\pi t})^{10/3}.$$

Для теоретичних кривих рівняння цієї асимптоти записується:

$$\frac{\rho_\tau}{\rho_1} = 8\pi^3 \cdot \left(\frac{2}{15} \right)^{2/3} \cdot \left(\frac{r}{h_1} \right)^{10/3} / \left(\frac{\tau_1}{h_1} \right)^{10/3}.$$

Її графічне зображення в логарифмічному масштабі має вигляд прямої низхідної лінії, нахиленої під кутом $\text{arctg}(-10/3) = -73^\circ 18'$ до горизонтальної осі (рис. 8.3).

У пізній стадії перехідного процесу ($t \rightarrow \infty$), де повністю виконується умова ближньої зони, криві ρ_τ виходять на дійсний питомий опір ρ_N останнього горизонту (основи розрізу) або ж на асимптоту S , якщо основа розрізу є ізолятором ($\rho_N = \infty$). Ця асимптота описується рівнянням:

$$\rho_\tau|_{t \rightarrow \infty} = \frac{1}{2\pi} \cdot \left(\frac{16}{225} \right)^{1/3} \cdot \frac{(\sqrt{2\pi t})^2}{\mu S^2} \approx 0,283 \frac{t}{\mu S^2}.$$

Її графічне зображення на логарифмічному бланку виражається висхідною прямою лінією, нахиленою під кутом $\text{arctg}2 = 63^\circ 25'$ до горизонтальної осі (рис. 8.3). Рівняння асимптоти може бути використане для визначення за нію сумарної поздовжньої провідності розрізу:

$$S \approx 189 \sqrt{2\pi t} / \sqrt{\rho_\tau} \approx 474 \sqrt{t / \rho_\tau}.$$

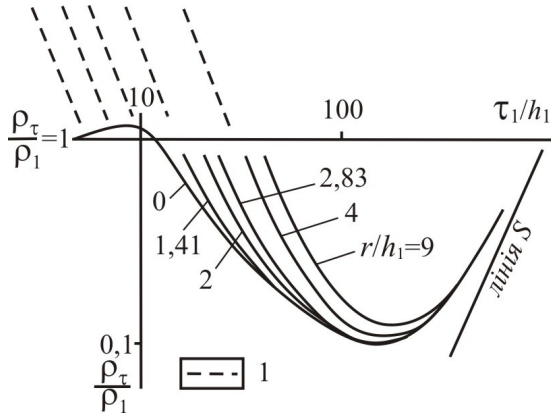


Рис. 8.3. Тришарові криві зондувань становленням магнітного поля заземленого диполя в ближній зоні для $\rho_2=1/16\rho_1$, $h_2=4h_1$, $\rho_3=\infty$:
1 – асимптоти кривих на ранніх часах

Інтерпретація кривих ефективного опору ρ_{τ} . Інтерпретація кривих ρ_{τ} у методі ЗСБЗ буває *якісною* й *кількісною*. Якісна інтерпретація повністю ідентична інтерпретації кривих ρ_{τ} у методі ЗСДЗ і зводиться до різноманітних профільних і площових графічних побудов, розглянутих вище в параграфі, присвяченому методу зондувань у дальній зоні. Кількісна інтерпретація кривих ρ_{τ} може виконуватися декількома способами: 1) способом характерних точок кривих, який реалізується на основі емпірично встановлених зв'язків координат точок екстремумів та перегинів кривих ρ_{τ} із параметрами розрізу; 2) палетковим способом – на основі графічного співставлення теоретичних та польових кривих ЗСБЗ і вибору їх найкращого збігу; 3) способом автоматизованого підбору параметрів розрізу із застосуванням комп'ютерів, який реалізується за спеціальними програмами, зокрема розробленими в Новосибірському відділенні РАН. На основі даних кількісної інтерпретації будуються геоелектричні розрізи, при площових дослідженнях – карти сумарної позовдгньої провідності S , структурні карти поверхонь геоелектричних горизонтів, карти товщин окремих горизонтів і т. ін.

Трансформація інформативних сигналів $\varepsilon(t)$ в ефективну поздовжню провідність S_{τ} і ефективну глибину досліджень H_{τ} . Даний спосіб запропонований В. О. Сидоровим і В. В. Тікшаєвим у 1969 році. Він призначений для забезпечення експрес-інтерпретації експериментальних даних у методі ЗСБЗ й отримав достатньо широке використання в практиці електрометричних досліджень.

Однією із форм зображення структури геоелектричного розрізу є побудова залежності його сумарної поздовжньої провідності S від глибини z . Функція $S(z)$ зі збільшенням глибини тільки зростає, але швидкість її зростання залежить від електричних властивостей порід. На глибинах, де розповсюджені мало-провідні пласти, швидкість зростання S уповільнюється (в ізоляторах взагалі зростання відсутнє), а в інтервалах, де провідність пластів зростає – підвищується й швидкість зростання S . У межах кожного однорідного горизонту функція $S(z)$ лінійна. Відтак, за зламами її графіка чітко встановлюються границі таких горизонтів, а за швидкістю зростання S – їх питома провідність $\gamma(z)$ чи питомий опір $\rho(z)$, які досить просто визначаються:

$$\gamma(z) = \Delta S / \Delta z, \quad \rho(z) = \Delta z / \Delta S,$$

де Δz – товщина виділеного пласта (відстань між сусідніми точками зламів графіка $S(z)$), ΔS – приріст поздовжньої провідності в межах виділеного пласта.

Метою трансформації інформативних сигналів перехідних процесів за методикою Сидорова-Тікшаєва є отримання залежності ефективної сумарної поздовжньої провідності S_{τ} від ефективної глибини дослідження H_{τ} , яка наближено відображає поведінку реальної глибинної функції розрізу $S(z)$. Розглянемо суть запропонованого Сидоровим-Тікшаєвим способу, який отримав назву способу "плаваючої площини".

Припустимо, що на поверхні горизонтально-шарового розрізу установкою ЗСБЗ із розносом r зареєстрований інформативний сигнал-відгук $\varepsilon(t)$. Будемо вважати, що в кожний фіксований момент часу електромагнітне поле поширюється на певну глибину H_{τ} . Сам зареєстрований сигнал у цей момент нормується (замінюється) сигналом для еквівалентної тонкої провідної

площини, яка має поздовжню провідність S_τ , що дорівнює сумарній поздовжній провідності розрізу в межах глибини поширення електромагнітного поля H_τ , яка розташована на певній середньозваженій глибині h_τ ($0 < h_\tau < H_\tau$). Вважається, що середньозважена глибина розташування еквівалентної провідної площини h_τ відповідає глибинній координаті "центра ваги" глибинної функції питомої провідності розрізу $\gamma(z)$ у межах глибини проникнення поля $0 < z < H_\tau$:

$$h_\tau(H_\tau) = \int_0^{H_\tau} z\gamma(z)dz / S_\tau(H_\tau)$$

Стоїть задача визначення поздовжньої провідності еквівалентної площини S_τ і глибини поширення поля H_τ (фактично глибини дослідження).

При збудженні перехідних процесів розглянутими вище установками, піднятими на висоту h_τ над тонкою провідною площиною з поздовжньою провідністю S_τ , сигнал індукційного датчика $\varepsilon(t) = -Q_{II} \cdot \partial B_z / \partial t$ (Q_{II} – ефективна площа датчика, $\partial B_z / \partial t$ – часова похідна вертикальної магнітної індукції), який знаходиться на тій же висоті h_τ , дорівнює:

$$\varepsilon(t) = \frac{I \cdot K}{S_\tau} \cdot \frac{m}{(1 + 4m^2)^{5/2}}, \quad (1)$$

де I – сила струму в джерелі збудження, K – коефіцієнт установки (величина відома), $m = h_\tau / r + t / (r\mu S_\tau)$ – безрозмірний параметр, r – рознос установки, $\mu = 4\pi \cdot 10^{-7}$ Гн/м.

На основі розв'язку *прямої задачі* способом "плаваючої площини" [18] (тут вона не розглядається) був установлений функціональний зв'язок між часом перехідного процесу t й глибиною поширення поля H_τ у вигляді $t = \mu S_\tau \left(\frac{4}{3} H_\tau - h_\tau \right)$, який дозволив встановити також зв'язок глибини поширення електромагнітного поля H_τ із безрозмірним параметром m і розносом установки r :

$$H_\tau = 0,75mr. \quad (2)$$

Отже, для розв'язання поставленої задачі необхідно з одного рівняння (1) для сигналу $\varepsilon(t)$ визначити дві невідомі величини – S_τ і m , що неможливо. Це робиться шляхом залучення ще одного рівняння – похідної сигналу $\varepsilon(t)$ за часом:

$$\varepsilon'(t) = \frac{\partial \varepsilon}{\partial t} = \frac{I \cdot K}{r\mu S_\tau^2} \cdot \frac{(1-16m^2)}{(1+4m^2)^{7/2}}. \quad (3)$$

Знаходять параметр m , розв'язуючи числовим способом цілком коректне щодо цього параметра, як шуканої невідомої величини, алгебраїчне рівняння:

$$I \cdot r\mu K (\varepsilon'/\varepsilon^2) = (1-16m^2)(1+4m^2)^{3/2}/m^2, \quad (4)$$

а, знаючи m за формулою (2), знаходять і глибину проникнення електромагнітного поля H_τ .

Поздовжня провідність S_τ при відомому значенні параметра m досить просто визначається з рівняння (1):

$$S_\tau = \frac{I \cdot K}{\varepsilon(t)} \cdot \frac{m}{(1+4m^2)^{5/2}}. \quad (5)$$

Отже, загальний алгоритм трансформації зареєстрованого індукційним датчиком перехідного процесу $\varepsilon(t)$ у глибинну, що залежить від ефективної поздовжньої провідності $S_\tau(H_\tau)$, наступний: 1 – для фіксованого моменту часу визначається амплітуда сигналу ε і числовим способом розраховується його часова похідна $\partial\varepsilon/\partial t$; 2 – числовим способом розв'язується алгебраїчне рівняння (4) і знаходиться безрозмірний параметр m ; 3 – за формулою (2) визначається ефективна глибина проникнення електромагнітного поля H_τ ; 4 – за формулою (5) розраховується ефективна поздовжня провідність розрізу S_τ ; 5 – у деяких випадках розраховують середньозважену глибину еквівалентної провідної площини h_τ згідно з формулою $h_\tau = mr - t/(\mu S_\tau)$. Описаний алгоритм трансформації застосовується для кожного часового дискрету t сигналу $\varepsilon(t)$.

Розглянутий спосіб трансформації перехідних процесів називається диференціальним, оскільки під час його реалізації застосовується операція диференціювання сигналу. Існує й інтегральна модифікація цього способу. У ній використовується операція інтегрування інформативного сигналу $\varepsilon(t)$, застосування якої до нормувального сигналу (1) приводить до наступного результату:

$$\int_t^{\infty} \varepsilon(t) dt = \frac{Ir\mu K}{4} \cdot \frac{1}{(1 + 4m^2)^{3/2}}. \quad (6)$$

Це дає можливість аналітичного визначення безрозмірного параметра m :

$$m = \frac{1}{2} \sqrt[3]{\left[0,25 Ir\mu K / \int_t^{\infty} \varepsilon(t) dt \right]^{2/3} - 1}.$$

Інтегральний спосіб більш стійкий через коректність операції числового інтегрування, але в ньому є свої суттєві вади, пов'язані з числовою реалізацією визначення невластного інтеграла. У практиці ЗСБЗ застосовують також інші алгоритми трансформації інформативних сигналів, наприклад, Г.А. Ісаєва та Ф.М. Каменецького

Для виконання трансформації зареєстрованих перехідних процесів за методикою Сидорова-Тікшаєва ("плаваючої площини") необхідно знати коефіцієнти установок, які відрізняються від раніше наведених коефіцієнтів, що використовуються при розрахунку кривих ефективного опору ρ_{τ} . Наведемо співвідношення цих коефіцієнтів для різних установок:

- 1) для установки "диполь-петля": $K = 3AB \cdot Q_{II} \cdot \sin \varphi / \pi r^3$;
- 2) для співвісної установки "петля в петлі" та суміщеної установки з квадратною формою генераторного контуру:

$$K = 96n_{\Gamma}^2 \cdot Q_{II} / (\pi Q_{\Gamma});$$

- 3) для співвісної установки "петля в петлі" та суміщеної установки із круглою формою генераторного контуру:

$$K = 6\pi n_{\Gamma}^2 Q_{II} / Q_{\Gamma}.$$

У наведених формулах прийняті наступні позначення: n_r – кількість витків у генераторній петлі, Q_r та Q_{Π} – ефективні площі генераторної та приймальної петель відповідно (сумарні площі всіх витків генераторної та прийомної петель).

При застосуванні однопетльових установок розрахунок їх коефіцієнтів виконується згідно із приведеними відповідними формулами з урахуванням того, що ефективні площі генераторної та приймальної петель однакові: $Q_r = Q_{\Pi}$.

За результатами трансформацій сигналів перехідних процесів у глибинну залежність $S_{\tau}(H_{\tau})$ виконується ряд графічних побудов. Найбільш уживані способи візуалізації результатів трансформації такі: побудова *розрізів ефективних провідностей* S_{τ} та *диференціальних провідностей* $\sigma_{\tau} = \partial S_{\tau} / \partial H_{\tau}$. На розрізах будують або самі криві $S_{\tau}(H_{\tau})$, як показано на рис.8.4, чи $\sigma_{\tau}(H_{\tau})$, або ізолінії цих ефективних геоелектричних параметрів.

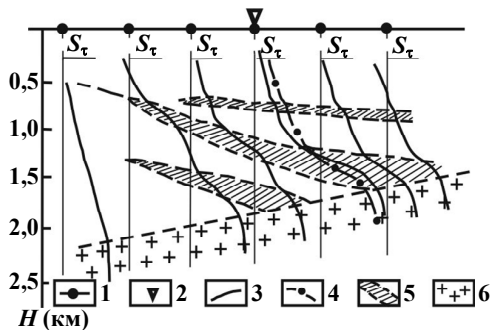


Рис. 8.4. Схематичний розріз ефективної поздовжньої провідності S_{τ} за даними інтерпретації ЗСБЗ способом "плавальної площини":
 1 – точки ЗСБЗ; 2 – свердловина; 3 – графік S_{τ} за даними ЗСБЗ;
 4 – графік S за каротажем; 5 – провідні горизонти; 6 – фундамент

За характерними змінами ходу кривих S_{τ} відслідковують границі горизонтів, а за ізолініями нерідко вдається локалізувати в розрізі аномальні області, пов'язані із присутністю рудних та нафтових покладів. На сучасному етапі обробка сигналів (накопичення, фільтрація) і їх трансформація практично повсюди автоматизовані та виконуються на персональних комп'ютерах.

Задачі, які вирішуються методом ЗСБЗ, приблизно такі ж як і в методі ЗСДЗ. Основна перевага зондувань становленням поля в ближній зоні – суттєво вища локальність результатів до-сліджень у плані. Ця перевага пов'язана з малими розносами установок та можливістю погоризонтного простежування зміни електричних властивостей порід, що важливо при пошуках родовищ нафти та газу. Щодо рудних родовищ ця модифікація електромагнітних зондувань показала непогані результати при пошуках провідних пластових покладів із пологим заляганням. У деяких випадках обнадійливі результати отримані при пошуках алмазних трубок. В останній час ЗСБЗ з успіхом застосовують для вивчення верхньої частини розрізу (ВЧР) при вирішенні інженерно-геологічних та екологічних задач, зокрема вивченні зсувних процесів. При застосуванні ЗСБЗ для дослідження ВЧР досить жорсткі вимоги висуваються до апаратурно-вимірювальних комплексів, у зв'язку з необхідністю якісного збудження й реєстрації досить коротких за тривалістю (десятки мікросекунд) перехідних процесів.

8.3. Методи низькочастотного індуктивного профілювання

Методи застосовуються для виявлення на площі досліджень неоднорідних за електропровідністю включень. Вони проводяться як під час загальних пошуково-картувальних зйомок, так і детальної розвідки родовищ добре провідних руд.

У групу низькочастотних індуктивних методів профілювання входять методи довгого кабелю (ДК), дипольного індуктивного профілювання (ДІП), незаземленої петлі (НП) та перехідних процесів (ПП). Вони використовують як гармонійні (від одиниць до перших десятків тисяч герц), так і неусталені поля.

Особливість індуктивних методів полягає в тому, що геометричні розміри установок, діапазон частот і час перехідних процесів вибираються такими, щоб дослідження велися в індукційній зоні джерела, тобто розміри досліджуваних об'єктів повинні бути малими в порівнянні з довжиною хвилі. У цьому випадку поле є синфазним для всіх точок об'єкта дослідження.

Змінне електромагнітне поле, що вимірюється в точках денної поверхні, є сумою нормального поля контуру джерела й аномального поля, зумовленого впливом локальних геологічних об'єктів. За фізичною природою аномалії електромагнітних полів поділяються на індуктивні (вихрові), кондуктивні (концентраційні) та магнітостатичні.

Індуктивні (вихрові) аномалії – це аномалії, що спричинені магнітним полем струмів, індукованих первинним змінним магнітним полем у добре провідних (рудних) тілах. *Кондуктивні (концентраційні) аномалії* – це аномалії, спричинені концентрацією в рудних об'єктах електричних струмів, наведених у вміщувальному середовищі, і виникненням при цьому (при перетині цими струмами границь поділу) поляризаційних зарядів на поверхнях рудних тіл. *Магнітостатичні аномалії* мають місце лише при наявності магнітних об'єктів – за рахунок їх намагнічування первинним магнітним полем.

У реальному геологічному розрізі, що знаходиться в первинному магнітному полі якого-небудь джерела, аномалії вихрового, концентраційного й магнітостатичного типів складно накладаються одна на одну. Спеціальним вибором типу джерела поля, частоти та часу реєстрації можна змінювати співвідношення між аномаліями різних типів і таким чином створювати модифікації індуктивних методів, ефективні при вирішенні конкретних задач.

8.3.1. Метод довгого кабелю

Джерелом поля в методі довгого кабелю (ДК) є прямолінійний кабель довжиною від 1 до 20 км, заземлений на кінцях і під'єднаний до генератора напруги низької частоти (до 1000 Гц). При достатньо довгому живильному кабелі метод інколи називають *методом нескінченно довгого кабелю* (НДК).

Кабель укладається вздовж очікуваного простягання структур та рудних тіл і добре заземлюється на кінцях. Сила струму живлення залишається постійною в процесі зйомки. Поле кабелю *AB* (рис. 8.4,а) досліджують на ділянці його середньої третини вздовж паралельних профілів, орієнтованих перпендикулярно кабелю й розташованих по

обидва боки від нього. Основними вимірюваними параметрами поля в методі ДК є: а) амплітуди горизонтальної та вертикальної компонент магнітного поля; б) відношення амплітуд і різниця фаз магнітних, рідше горизонтальних електричних складових у двох точках, розташованих на відстані 5 – 10 м; в) інколи вимірюються елементи еліпса поляризації поля. Виміри магнітного поля можуть виконуватися також в аероваріанті на висоті 50 – 60 м за допомогою гелікоптера або літака, що буксирує датчик магнітного поля.

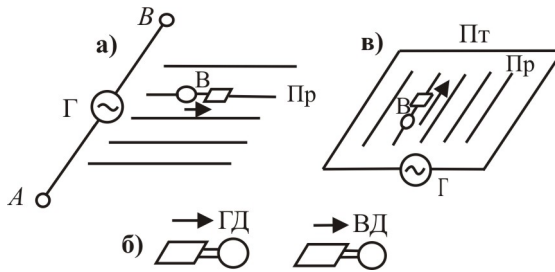


Рис. 8.5. Модифікації індуктивних методів:
а – метод довгого кабелю; б – метод незаземленої петлі;
в – дипольне індуктивне профілювання

За результатами зйомок методом ДК уздовж профілів будуються графіки вимірюваних параметрів поля та карти графіків (кореляційні плани). Інтерпретація матеріалів в основному якісна та зводиться до кореляції аномалій по профілях та встановлення їх природи шляхом співставлення з геологічними даними.

Метод ДК є пошуково-картувальним і застосовується для вирішення задач геологічного картування, виявлення крутоспадних контактів, пластів, тектонічних зон, пошуків порід із підвищеною провідністю (ділянок графітизації, піритизації, тріщинуватості), пошуків добре провідних масивних руд.

Дипольне індуктивне профілювання

Метод дипольного індуктивного профілювання (ДІП) являє собою модифікацію індуктивної електророзвідки, де джерелом первинного збуджувального поля є магнітний генераторний

диполь ГД (рис. 8.4,б) – багатовиткова рамка з розміром, який, як правило, не перевищує 1 – 2 м. У процесі польових робіт генераторний і вимірювальний (ВД) диполі переміщуються по профілю з постійним розносом без зміни їх взаємного розташування. Умова дипольності зберігається при розносі у 2 – 3 рази більшому від розмірів рамок. Рознос повинен бути сумірним із проектованою глибинністю розвідки.

Вимірювальна рамка встановлюється на тринозі, вона може обертатися навколо горизонтальної та вертикальної осей. З її допомогою вимірюють вертикальну H_z і горизонтальну H_r складові магнітного поля. Можуть також вимірюватись елементи еліпса поляризації – велика H_a і мала H_b півосі та кут нахилу великої осі до горизонту.

У результаті зйомки будуються окремі графіки, карти графіків, карти вимірюваних параметрів. Інтерпретація даних в основному якісна і подібна до методу ДК. Окремі чіткі аномалії можуть інтерпретуватись кількісно: за формою аномалії й по характерних точках можна оцінити форму й умови залягання рудного об'єкта, а за частотними характеристиками (на стадії деталізації) – його електропровідність, що дає змогу провести класифікацію аномалій на "рудні" і "нерудні".

Метод ДПП може бути реалізований і в аероваріанті. Для цього генераторний контур закріплюється навколо фюзеляжу гелікоптера (наприклад, КА-26), а виносна приймальна рамка – у гондолі, що буксирується на кабель-тросі довжиною 35 – 50 м.

Метод ДПП пошуковий і пошуково-картувальний. Головним чином застосовується для пошуків провідних рудних покладів. Інколи він застосовується й при вирішенні інженерно-геологічних задач.

8.3.3. Метод незаземленої петлі

У методі незаземленої петлі (НП) джерелом первинного магнітного поля є прямокутна чи квадратна петля з розмірами сторін до 1 – 2 км, яка живиться змінним струмом від генератора G (рис. 8.4, в). Первинне магнітне поле в середній частині петлі є практично однорідним і характеризується наявністю лише вертикальної компоненти H_z . Отже, ця область є сприятливою для виявлення горизонтальних,

полого нахилених, а також локальних провідних об'єктів, оскільки первинне магнітне поле орієнтоване перпендикулярно до них. Поза межами петлі структура первинного магнітного поля ускладнена наявністю в ньому горизонтальної компоненти.

Амплітудно-фазові виміри параметрів електромагнітного поля (вертикальної та горизонтальної компонент магнітного поля, відношення їх амплітуд і різниці фаз у двох точках) виконуються вздовж паралельних профілів, розташованих або всередині петлі, або поза нею на відстанях від 10 до 100 м один від одного. Напрямок профілів вибирається перпендикулярним простяганню об'єктів. Довжина внутрішніх профілів складає $1/2 - 1/3$ довжини короткої сторони петлі. При суцільних площових зйомках петля переміщується або перпендикулярно, або паралельно профілям із врахуванням необхідності повторення вимірів (перекриттів) по одному із крайніх профілів або в декількох точках усіх профілів. Основні вимірювані параметри в полі незаземленої петлі ті ж самі, що і в методі ДПП.

За результатами робіт будуються карти графіків та ізоліній параметрів поля, а на деталізаційних точках – частотні характеристики вимірюваних параметрів. Інтерпретація матеріалів при пошукових роботах якісна, а при деталізаційних – кількісна (визначається електропровідність та розміри об'єктів, їх глибини залягання).

Метод НП ставиться на перспективних ділянках для пошуків і розвідки рудних корисних копалин. Глибинність розвідки до 150 – 200 м.

8.3.4. Метод перехідних процесів

Метод перехідних процесів (МПП) відноситься до групи індуктивних методів електророзвідки й призначений головним чином для пошуків родовищ добре провідних руд і для геологічного картування. Збудження та вимірювання магнітного поля в цьому методі здійснюються індуктивним способом.

По живильному контуру пропускається імпульсний струм, що створює ступінчасто змінюване первинне магнітне поле, яке збуджує в провідних об'єктах вихрові струми. Індуковані струми з плином часу затухають унаслідок теплових втрат і

перерозподіляються, поширюючись від поверхні провідника до глибинних його частин. Чим більші електропровідність і розміри об'єктів, тим повільніше відбувається процес згасання та перерозподілу поля, тобто тим довше триває перехідний процес. Отже, за типом перехідної характеристики можна зробити висновки про розміри та електропровідність об'єкта досліджень.

Методом перехідних процесів вивчається нестационарне електромагнітне поле, збурене за допомогою незаземлених контурів (подібно до методу ЗСБЗ або ЗМПП). Тривалість імпульсів струму в генераторній петлі варіює від 20 до 40 мс, а тривалість пауз між імпульсами – від 30 до 80 мс.

Існують два способи вимірів перехідних процесів. Перший спосіб полягає в тому, що вторинне індуковане поле вимірюється за допомогою автономної вимірювальної рамки, що переміщується по профілях у межах планшета центральної частини петлі (подібно до методу незаземленої петлі НП). Цей спосіб отримав назву рамково-петльового (МППР). Другий спосіб – це однопетльова модифікація методу перехідних процесів (МППО), в якій застосовується установка із суміщеними генераторною й вимірювальною петлями. Ця модифікація тотожна розглянутому вище методу ЗСБЗ (ЗМПП) у варіанті суміщеної установки. Відмінність МППО від ЗМПП лише в кількості часових затримок, на яких вимірюється сигнал. У МППО цих затримок значно менше.

Роботи методом МПП включають два етапи: *загальна* чи *пошукова зйомка* та *детальна*. Головна задача *загальної (пошукової) зйомки* – виявлення в межах досліджуваної площі зон з аномальною поведінкою неусталеного поля, яке може бути зумовлене присутністю родовищ добре провідних руд. Площова пошукова зйомка зазвичай виконується установкою із суміщеними генераторною та вимірювальною петлями (методика МППО).

Дані площової зйомки за методикою МППО використовують для попередньої оцінки характеру аномальних зон. За результатами цієї зйомки будують карти ізоліній нормованого за струмом I сигналу $\varepsilon(t)$ перехідного процесу на одній або декількох часових затримках. Приклад такої карти для одного з родовищ

наведений на рис. 8.5. Над провідними об'єктами згасання поля уповільнюється, відтак рудні об'єкти на картах фіксуються підвищеними значеннями нормованого по струму зареєстрованого сигналу $\varepsilon(t)/I$.

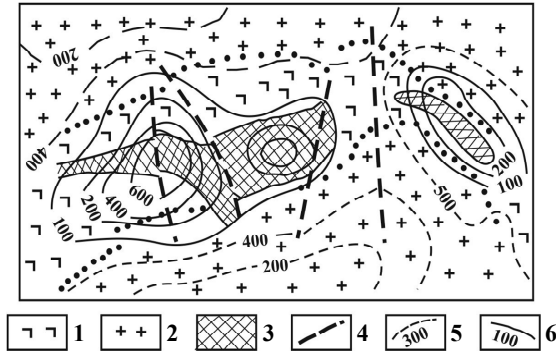


Рис. 8.6. Карта ізоліній амплітуди сигналу перехідного процесу на мідно-колчеданному родовищі:

1 – габро-діабазити; 2 – гранодіорити; 3 – проєкції рудних тіл на поверхні;
4 – розломи; 5 і 6 – ізолінії $\varepsilon(t)/I$ для часу 1 і 2 мс

На етапі деталізації аномалій, виявлених у процесі площової зйомки, перед польовими роботами ставиться завдання щодо отримання інформації про природу досліджуваного об'єкта та елементи його залягання.

Детальні зйомки рекомендується виконувати з автономною рамкою, що переміщується по профілю (МППР). Для зменшення впливу аномалій кондуктивного типу генераторну петлю необхідно розкласти так, щоб аномальна зона була в центрі. Менша сторона петлі (якщо петля прямокутна) не менше ніж у 1,5 раза повинна бути більшою від глибини досліджень. Виміри неусталеного поля виконують на 5 – 7 затримках по густій сітці польових точок. Побудови за результатами робіт такі ж, як і в методі НП.

Деталізаційні роботи можна виконувати також суміщеною установкою за методикою МППЮ. У цьому випадку розміри петель у 2 – 4 рази менші, ніж при площовій зйомці. При застосуванні для амплітудних досліджень суміщених установок виміри проводяться вздовж окремих інтерпретаційних профілів, що

перетинають аномальну зону, по густій мережі точок і з мінімальним розміром петель, за якого сигнал ресструється ще досить впевнено. Метод МПП може бути реалізований і в аероваріанті, аналогічно до методу ДПП. Для польових досліджень застосовується апаратура типу "Імпульс-Ц". Порядок вимірювань визначається інструкцією по експлуатації конкретного типу апаратури.

Монтажна схема установки для проведення робіт методом перехідних процесів у варіанті суміщених петель показана на рис. 8.7. Вона включає: а) джерело нестационарного поля – незаземлену генераторну петлю (1); б) приймальну петлю, просторово поєднану з генераторною (2); в) генераторний (3) і вимірювальний (4) блоки; г) джерела живлення (5, 6); д) з'єднувальні кабелі.

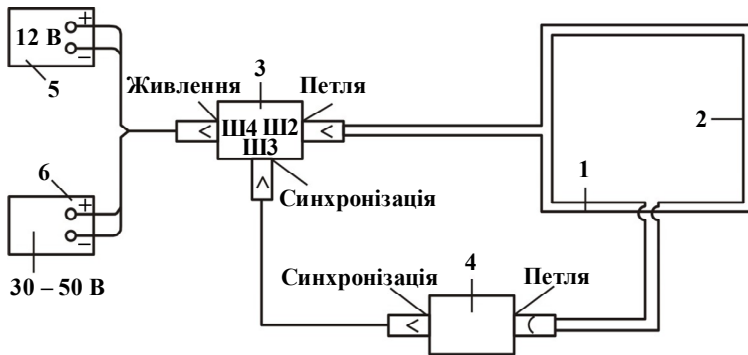


Рис. 8.7. Монтажна схема установки для роботи методом МПП із суміщеними петлями

Генераторно-приймальна петля монтується з подвійного проводу типу ПСРП, який намотується на котушку, що входить у заводський комплект. Для цього береться відрізок подвійного проводу ПСРП завдовжки 210 м, один (внутрішній) кінець якого виводиться через отвір на осі котушки на її бічну щок, а інший після намотування на котушку залишається вільним. Потім за допомогою омметра знаходять кінці відповідних жил подвійного проводу й монтують на них стрижневий та гніздовий кінці електророзвідувального роз'єму, що відповідають роз'ємам "петля" на генераторному та вимірювальному блоках.

Методика польових робіт. Польові роботи методом перехідних процесів у варіанті суміщених петель включають: а) топографічну підготовку ділянки робіт; б) підготовку установки до роботи; в) підготовку апаратури до вимірів; г) виконання вимірів; д) обробку та зображення результатів польових робіт.

Топографічна підготовка ділянки робіт. Робота методом перехідних процесів у варіанті суміщених петель починається з розбиття контурів петель. Для цього за допомогою бусолі розбиваються профілі, пікети на яких знаходяться на такій відстані, що можуть бути кутами генераторно-вимірювальних петель. Потім за допомогою тієї ж бусолі розбиваються бічні сторони квадратних петель. Уздовж контурів петель ставляться вишки висотою близько 1,5 м через 10 – 25 м, залежно від видимості на ділянці. Таким чином, на місцевості розбивається контур для суміщених приймальної та генераторної петель.

Підготовка установки до роботи. Підготовка починається з розкладання петлі подвійним (біфілярним) проводом із попередньо підготовлених котушок. Котушки розташовуються так, щоб з однієї стоянки можна було розкласти чотири петлі. На тій же стоянці встановлюють приймально-генераторну апаратуру. Один із працівників обходить контур уздовж проставлених задалегідь вишок і розмотує провід з котушки, яку несе із собою. Другий працівник розкладає наступну петлю. Після закінчення розмотування петлі оператор перевіряє її цілісність за допомогою омметра та визначає опір.

Опір петлі не повинен більше, ніж в 1,2 раза перевищувати величину, що розраховується за формулою: $R = rL$, де r – погонний опір проводу, L – його довжина. Інакше слід перевірити цілісність проводів петлі і якість контактів у місцях з'єднання відрізків проводу, після чого ще раз виміряти опір петлі.

У подальшому необхідно виконати наступні операції:

1. Установити генераторний і вимірювальний блоки на ізольовані підставки.

2. Приєднати до них за допомогою наявних у комплекті спеціальних з'єднувальних кабелів петлю, підвести джерела живлення та з'єднати генераторний і вимірювальний блоки кабелем "синхронізація".

3. Перевірити опір ізоляції генераторної та приймальної петель за допомогою мегаомметра, для чого слід приєднати один кінець петлі, що перевіряється, до однієї з клем мегаомметра, а другу клему заземлити. Нормальним вважається опір ізоляції не менше 1 МОм.

4. Перевірити за допомогою мегаомметра опір ізоляції між генераторною та приймальною петлями, для чого слід приєднати до однієї клемі мегаомметра кінець генераторної петлі, а до іншої – кінець приймальної петлі. Опір ізоляції має бути не менше 1 МОм. Якщо опір ізоляції виявиться меншим 1 МОм, необхідно знайти пошкоджену ділянку проводу, заізолювати її й ще раз провести перевірку.

Підготовка апаратури до вимірів полягає в перевірці працездатності її окремих блоків і комплекту в цілому згідно з інструкцією по експлуатації.

Польові виміри здійснюються в наступному порядку: готується генераторно-вимірювальна петля й розкладається на місцевості по раніше розбитому контуру. Виконуються вимірювання згідно з інструкцією по експлуатації застосовуваної апаратури.

У процесі вимірювань оператор диктує результати вимірів обчислювачу, який після кожного виміру записує значення часу затримки t , сили струму I та відліки $n_1=\varepsilon_1(+)$ і $n_2=\varepsilon_2(+)$ при різних полярностях збуджувального імпульсу струму, обчислює $\varepsilon_1(+)/I$, $\varepsilon_2(-)/I$, а також похибку δ , яка розраховується за формулою:

$$\delta = \frac{|\varepsilon_1(+)| - |\varepsilon_2(-)|}{|\varepsilon_1(+)| + |\varepsilon_2(-)|} \cdot 100\% ,$$

і будує польові графіки розподілу середнього значення нормованого по струму сигналу ε_t/I уздовж лінії профілю, яка з'єднує центри петель. При виконанні вимірів на декількох затримках будуються також перехідні характеристики для кожної точки профілю (для кожної петлі), тобто графіки залежності ε_t/I від t .

Якщо перехідні характеристики мають плавний характер, оператор підключає до приймально-вимірювальної апаратури наступну петлю або подає команду до перенесення установки на наступну точку. Для якісного виконання польових вимірів необхідно, щоб рівень завад складав не більше 1/3 від рівня

За результатами обчислень будують профільні графіки розподілу σ_{II} (так само, як графіки розподілу ε_1/I). Побудовані криві аналізуються, здійснюється їх інтерпретація.

Кількісна інтерпретація експериментальних даних виконується на основі профільних аномальних графіків та перехідних характеристик. Непогані результати дають прийоми інтерпретації, що застосовуються в методі ЗСБЗ (ЗМПП).

Областю застосування методу перехідних процесів є, в основному, пошук добре провідних рудних покладів. Цим методом можна вирішувати також деякі задачі геологічного картування.

Завдання

1. Змонтувати установку для виконання польових спостережень методом перехідних процесів у варіанті сумішених петель.
2. Вивчити функціональну схему роботи застосовуваної апаратури.
3. Виконати перевірку апаратури в умовах бази.
4. Виконати топографічну підготовку ділянки робіт.
5. Підготувати апаратуру до вимірів у польових умовах.
6. Виконати польові роботи на двох профілях.
7. Обробити результати польових спостережень, побудувати профільні графіки ε_1/I або σ_{II} , а також перехідні характеристики ε_1/I .
8. Дати коротке геологічне тлумачення отриманим результатам.

Після закінчення роботи бригада представляє наступні звітні матеріали: 1) польовий журнал; 2) журнал обробки; 3) графіки розподілу ε_1/I та σ_{II} ; 4) перехідні характеристики ε_1/I або графіки залежності σ_{II} ; 5) коротке геологічне тлумачення отриманих результатів.

8.4. Метод природного імпульсного електромагнітного поля Землі

Природне імпульсне електромагнітне поле Землі (ПЕМПЗ) генерується гірськими породами під час дії на них механічних напружень. Природа джерел ПЕМПЗ розглянута в розділі 2 (п. 2.2.6) даного навчального посібника.

Дослідження методом ПЕМПЗ виконуються здебільшого для діагностики напружено-деформованого стану масивів гірських порід на ділянках розвитку зсувів, при вивченні зсувних процесів і виділенні ділянок їх розвитку й активізації. Досвід показує, що індикатором такого стану є специфічний режим зміни імпульсного електромагнітного поля на локальних ділянках, де відбувається накопичення механічних напружень.

8.4.1. Методика робіт

Серійна апаратура, призначена спеціально для спостережень ПЕМПЗ, зараз відсутня. Тут можуть застосовуватися прилади, що використовуються при низькочастотних методах електророзвідки, а також методах індукції, радіокіп, радіопросвічування. Тоді необхідна деяка переробка серійної електророзвідувальної апаратури для настроювання вхідних контурів на необхідний діапазон частот і вимірів швидкості рахунку імпульсів чи величини, пропорційної їм.

В Україні для реалізації методу ПЕМПЗ застосовується індикатор РВІНДС-П-03, розроблений у Західно-Українській геологорозвідувальній експедиції (ЗУГРЕ), який обладнаний електричною штировою та магнітною антенами. Перший тип антен призначений для вимірів напруженості електричного поля, другий – для вимірів магнітного потоку.

Вимірювання швидкості надходження імпульсів (інтенсивності електромагнітного випромінювання) виконується двома приладами РВІНДС-П-03. Один індикатор використовується для вимірювання на рядових точках профілю, другий – для вимірювання протягом робочого дня варіацій інтенсивності випромінювання природного імпульсного електромагнітного поля Землі на контрольному пункті, який вибирається при можливості у відносно спокійному з точки зору механічних навантажень місці.

У методичному плані польові спостереження швидкості надходження імпульсів ПЕМПЗ виконуються по заздалегідь розбитій сітці профілів і пікетів на них. Профілі задають,

керуючись звичайними для електророзвідки методичними міркуваннями. Для виявлення об'єкта, що має чітко виражене простягання, їх орієнтують упоперек нього з таким розрахунком, щоб у досліджувану прогнозовану аномальну зону (область зсуву) попало не менше 3 точок при заданому кроці спостережень. Зазвичай на кожному досліджуваному зсуві закладають 1 – 2 центральних профілі вздовж його осі чи паралельно їй і 3 – 5 поперечних профілів із виходом кожного за межі зсуву на 50 – 100 м в обидва боки. У випадку виявлення аномалії інтенсивності випромінювання ПЕМПЗ крок спостережень зменшують для її деталізації. Деталізацію виділених аномальних зон виконують шляхом вимірів ПЕМПЗ на допоміжних 2 – 3 профілях, розташованих між тими, на яких виявлена аномалія, із розрахунку на виділення 5 – 9 аномальних точок по кожному профілю.

У зонах механічних напружень, де спостерігаються збільшення анізотропності поля та різка зміна азимутів максимальної інтенсивності, здійснюється деталізація як на основному, так і на суміжних проміжних профілях.

Вимірювання проводяться в широкому діапазоні частот (2 – 50 кГц) у двох напрямках орієнтації антени (при фіксованій висоті антени від денної поверхні): по профілю – у бік максимальної інтенсивності випромінювання імпульсів електромагнітного поля й упоперек простягання профілю – по схилу. У кожному напрямку виконується біля 10 вимірювань інтенсивності ПЕМПЗ, що забезпечує їх статистичну обробку. Інтервал вимірювань складає біля 1 секунди.

Вимірювання варіацій на КП проводиться в інтервалах: 5 с, 15 с, 30 с, 1 хв, 5 хв – рідко через інтервали: 30 с, 1 хв, 5 хв, 10 хв, 15 хв, 30 хв, 1 година. Для визначення швидкості лічби число зафіксованих імпульсів відносять до часу експозиції. Орієнтація приймальної антени при цьому здійснюється в напрямку простягання профілів (у бік максимальної інтенсивності випромінювання імпульсів ПЕМПЗ). На початку і в кінці робочого дня на КП перевіряється ідентичність приладів. Отримані дані по варіаціях враховуються при обробці польових матеріалів.

8.4.2. Аналіз експериментальних даних

При інтерпретації даних методу ПЕМПЗ, в якому вимірюється швидкість надходження імпульсів електромагнітного поля Землі при орієнтації антени по профілю, тобто "перпендикулярно схилу" – J_m , та впоперек профілю, тобто "вздовж схилу" – J_l , визначаються середні арифметичні значення J_m і J_l із 10 послідовних вимірів, проведених за мінімальний проміжок часу. Враховуючи, що кожна із цих складових (J_m і J_l) поряд з корисною інформацією несе також завади, Н. Р. Хархаліс [22] запропонував для оцінки небезпеки зсувних процесів ввести параметр, який називається кореляційним коефіцієнтом анізотропії (χ):

$$\chi = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n J_{m,i} / J_{l,i} ,$$

де $J_{m,i}$ і $J_{l,i}$ – значення швидкості надходження імпульсів електромагнітного поля в точці спостереження при орієнтації антени приймача по профілю та перпендикулярно до нього; n – кількість вимірювань на точці спостереження.

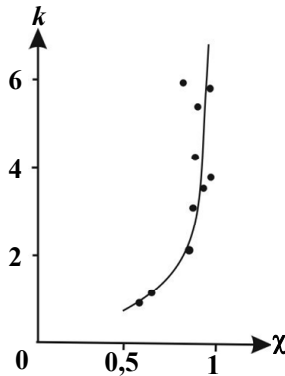


Рис. 8.8. Графік залежності коефіцієнта стійкості схилу (k) і кореляційного коефіцієнта анізотропії (χ)

Відношення J_m/J_l дозволяє зменшити рівень завад, які реєструються при тій чи іншій орієнтації антени. Припускається, що з допомогою параметра χ можна досить однозначно визначити стадії напружено-деформованого стану схилу.

Про правильність такого припущення свідчать результати кореляційного зв'язку коефіцієнтів стійкості k й анізотропії χ , наведеного в роботі Н. Р. Хархаліса [22].

Із графіка залежності коефіцієнтів k і χ (рис.8.8) видно, що зі зменшенням величини χ зменшується стійкість схилу. Так критичному значенню $k = 1$ відповідає $\chi = 0,6$; $k = 1,8$ при $\chi = 0,8$; $k = 3,4$ при $\chi = 0,9$. Тому при інтерпретації матеріалів ПЕМПЗ значення коефіцієнта анізотропії прийнято за основний інформаційний параметр. На картах площових спостережень ПЕМПЗ і профілях режимних вимірів виділяються відповідно ділянки й інтервали, що відповідають значенням $\chi = 0,6$, тобто таким, що характеризують критичний стан стійкості схилів ($k = 1$). Критичний стан таких ділянок, як правило, підтверджується й аномально високими показниками динамічності поля δJ :

$$\delta J = (J_{max} - J_{min}) / J_{min},$$

де J_{max} і J_{min} – максимальне та мінімальне значення швидкості надходження імпульсів електромагнітного поля Землі в одній точці режимних спостережень. В. Д. Чебан [23] рекомендує вказаний параметр використовувати при обробці результатів вимірювання для виділення складової ПЕМПЗ, зв'язаної з напружено-деформованим станом порід, під час роботи тільки з одним приладом.

За результатами зйомки методом ПЕМПЗ та обробки експериментальних даних будуються карти інтенсивності випромінювання ПЕМПЗ, карти коефіцієнта анізотропії ПЕМПЗ χ та карти динамічності δJ , інформативність яких враховується при виділенні зсувонебезпечних ділянок. Зазвичай метод ПЕМПЗ застосовується в комплексі з вертикальними електричними мікророзондуваннями (МЕЗ) та сейсмічним методом заломлених хвиль (МЗХ). Інколи в геофізичний комплекс включають і метод природного електричного поля (ПП).

Завдання

1. Вивчити функціональну схему роботи застосовуваної апаратури.
2. Виконати перевірку апаратури в умовах бази.
3. Виконати топографічну підготовку ділянки робіт.

4. Підготувати апаратуру до вимірів у польових умовах, перевірити ідентичність роботи приладів.

6. Виконати польові роботи на підготовленій ділянці.

7. Обробити результати польових спостережень, побудувати карти інтенсивності випромінювання ПЕМПЗ, карти коефіцієнта анізотропії ПЕМПЗ та карти динамічності δJ .

8. Дати коротке геологічне тлумачення отриманим результатам.

Після закінчення роботи бригада представляє наступні звітні матеріали: 1) польовий журнал; 2) журнал обробки; 3) карти інтенсивності випромінювання ПЕМПЗ; 4) карти коефіцієнта анізотропії ПЕМПЗ χ ; 5) карти динамічності ПЕМПЗ δJ ; 6) коротке геологічне тлумачення отриманих результатів.

9. ВИСОКОЧАСТОТНІ МЕТОДИ ЕЛЕКТРОРОЗВІДКИ

До високочастотних (*радіохвильових*) методів відносяться методи, в яких використовуються змінні електромагнітні поля частот 10 кГц – 300 МГц. Ці поля вивчають у хвильовій (дальній) або проміжній зонах джерела, тобто на відстанях, що набагато перевершують довжину хвилі або порівнювані з нею.

На характер електромагнітних полів радіохвильових частот суттєвий вплив мають струми зміщення й діелектрична проникність середовища. В області радіохвильових частот суттєво збільшується поглинання електромагнітного поля провідним середовищем. Коли довжина хвилі значно менша за відстань до точки виміру й лінійних розмірів досліджуваних геологічних об'єктів, то, із певним наближенням, можна застосувати закони геометричної оптики до електромагнітних полів та використовувати такі явища, як відбиття, заломлення, поляризація електромагнітних хвиль на границях поділу порід із різними електромагнітними властивостями, виникнення тінювих ефектів за рахунок поглинання полів об'єктами тощо.

Відомо багато модифікацій радіохвильових методів. Зупинимося на розгляді деяких із них.

9.1. Радіокомпараційний метод (метод радіокіп)

Метод ґрунтується на вивченні електромагнітних полів в дальній зоні довгохвильових (ДХ-РК) при довжині хвилі в повітрі $\lambda_0 = 1 - 10$ км або спеціальних наддовгохвильових (НДХ-РК) при $\lambda_0 = 10 - 100$ км мовних радіостанцій. Довгі й наддовгі радіохвилі розповсюджуються у вигляді земних хвиль, тобто хвиль, що проходять уздовж поверхні землі, огинаючи її завдяки дифракції. Ці хвилі проникають у землю на певну глибину,

яка зростає зі збільшенням довжини хвилі й опорю порід. Так при довжинах хвиль від 1 до 100 км глибина проникнення радіохвилі в породи з опором 100 – 1000 Ом·м змінюється приблизно від десяти до ста метрів.

Напруженість поля в дальній зоні ($r/\lambda \geq 10$) мало змінюється з відстанню й визначається, в основному, електромагнітними властивостями порід поблизу точки виміру. Заломлена хвиля збуджує в неоднорідному середовищі вторинне поле, яке зумовлює появу локальних аномальних ефектів, особливо, коли зустрічаються контакти середовищ із різними електромагнітними властивостями. Це дозволяє, вимірюючи радіополя, виконувати радіохвильове картування, тобто виявляти геоелектричні неоднорідності.

Польова зйомка методом радіокіп. Частіше за все польова зйомка методом радіокіп буває площевою. Вона ведеться польовими вимірювачами напруженостей поля (ПВНП). Датчиком магнітного поля є обертальна навколо вертикальної та горизонтальної осей рамка, а електричного – ізольовані або заземлені на кінцях лінії довжиною до 20 м. Зйомка ведеться по профілях, зорієнтованих поперек простягання порід (напрямок x), із відстанню між профілями 10 – 100 м і кроком 5 – 50 м (на аномальних ділянках до 2 м). Під час пошуків провідних об'єктів досить виміряти повну горизонтальну H_ϕ (обертанням рамки навколо вертикальної осі домагаються максимального сигналу) і вертикальну H_z (рамка горизонтальна) складові магнітного поля.

При вирішенні картувальних задач і пошуках непровідних тіл доцільно вимірювати H_y і E_x (вертикальна площина рамки та приймальна лінія, зорієнтовані вздовж профілю) або H_ϕ і $E_r = \sqrt{E_x^2 + E_y^2}$. За результатами вимірів можна визначити імпеданс поля $Z = E_x/H_y = E_r/H_\phi$ й ефективний питомий опір середовища ρ_{ef} : $\rho_{ef} = |Z|^2 / (\omega\mu)$. Метод радіокіп застосовується також у підземному, аеро- та автомобільному варіантах (зйомка в русі).

Інтерпретація даних. У методі радіокіп інтерпретація даних в основному якісна. Будуються карти графіків і кореляційні плани вимірених параметрів чи ефективного опорю ρ_{ef} . За аномаліями

виділяють контакти порід, пласти, зони тектонічних порушень, рудні та нерудні об'єкти. Аномалії, типові для різних геологічних розрізів, зображені на рис. 9.1.

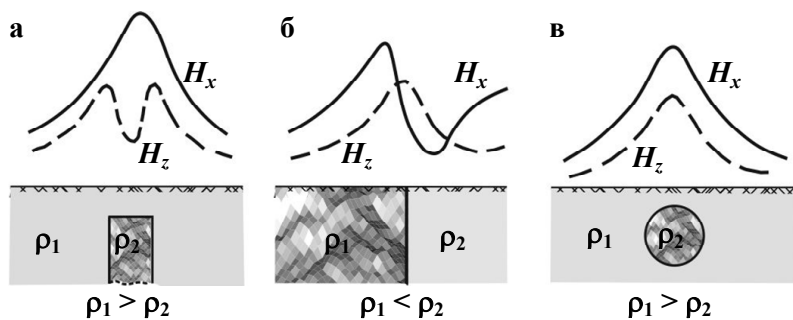


Рис. 9.1. Аномалії полів дальніх радіостанцій над різними геоелектричними розрізами:

а – круто нахилений провідний поклад; б – контакт порід;
в – ізометричний локальний провідник

Метод радіокіп використовують для вирішення задач великомасштабного геологічного картування, пошуків і розвідки рудних і нерудних корисних копалин, виявлення обводнених і картування мерзлих порід. Глибинність методу не перевищує 10 – 100 м і залежить від електропровідності геоелектричного розрізу.

9.2. Метод дипольного електромагнітного профілювання

Раніше метод дипольного електромагнітного профілювання (ДЕМП) називався *методом індукції*. Цей метод вивчає магнітні складові напруженості електромагнітного поля в проміжній зоні портативного наддовгохвильового радіопередавача, що працює на рамкову антену. Практично ДЕМП нічим не відрізняється від методу ДП, розглянутого раніше. Відмінність лише в частотах (у ДЕМП частота вище 10 кГц, а отже він умовно віднесений до високочастотних).

У методі ДЕМП розрізняють загальну та профільну зйомки. *Профільна зйомка* подібна до методу ДП. *Загальна зйомка* застосовується для розвідки добре провідних витягнутих рудних тіл.

Для цього вимірюється H_z і кут нахилу α сумарного вектора напруженості магнітного поля в точках, розташованих через 10 – 30 м по колу радіусом до 100 м із передавачем у центрі. За аномаліями графіків H_z і α (точки переходу через нуль) виявляють осі рудних об'єктів ("електричні осі").

ДЕМП призначений для вирішення тих же задач, що й ДПІ та радіокомпараційний метод. Глибинність досліджень не перевищує 50 м.

9.3. Метод радіохвильового просвічування

Метод радіохвильового просвічування (МРХП, РП) є провідним методом підземної електророзвідки, призначеним для вивчення цілості порід між свердловинами або гірськими виробками, для пошуків рудних тіл, виявлення обводнених та зруйнованих порід. У різних варіантах методу радіохвильового просвічування вивчаються явища поглинання, відбиття та дифракції високочастотних електромагнітних хвиль (частота поля 100 кГц – 100 МГц) у гірських породах. За затуханням електромагнітних хвиль у просвічуваному масиві порід можна робити висновки про наявність рудних тіл, установлювати їх форму, розміри, умови залягання, а також виявляти обводнені тектонічні порушення. Найбільш розповсюджені модифікації радіопросвічування – радіопросвічування між свердловинами, радіопросвічування з-під землі на поверхню, шахтне радіопросвічування.

Припустимо, що в одній із свердловин розташований радіопередавач Г, що випромінює електромагнітні хвилі, а по сусідній свердловині переміщується приймач П, за допомогою якого вимірюють напруженість електромагнітного поля (рис. 9.2). Напруженість поля в точці виміру залежить не тільки від відстані між передавачем і приймачем, але ще й від електричних властивостей середовища, через яке розповсюджуються електромагнітні хвилі. За наявності на шляху розповсюдження радіохвиль тіла, що має високу провідність, амплітуда вимірюваного сигналу зменшиться за рахунок поглинання радіополя цим об'єктом (утвориться "радіотінь"). На основі явища

поглинання радіохвиль реалізуються міжсвердловинна та шахтна модифікації методу РП.

Під час міжсвердловинного просвічування застосовують дві системи спостережень: кроковий (віяловий) спосіб, за якого поле на окремих інтервалах вимірюваної свердловини реєструється при нерухомому передавачу (рис. 9.2, а), і спосіб паралельного переміщення передавача та приймача (рис. 9.2, б).

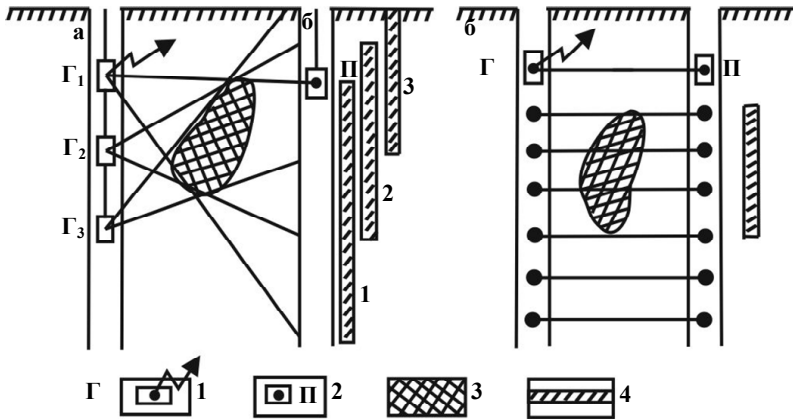


Рис. 9.2. Свердловинне радіопросвічування (а – віяловий спосіб; б – спосіб паралельного переміщення):

1 – радіопередавач; 2 – приймач; 3 – рудне тіло; 4 – зона "радіотіні"

При свердловинному радіопросвічуванні використовують, як правило, електричні антени, під час шахтного – електричні (інколи магнітні) генераторні антени та магнітні приймальні. Крок вимірів залежить від необхідної детальності досліджень, тобто від розмірів об'єктів пошуку та їх будови. При синхронному способі вимірів він коливається в межах від 10 м до 1 м (при деталізації). У віяловому способі виміри сигналів виконують при ряді стоянок генератора. Відстань між стоянками генератора приймають 20 – 30 м, крок приймача такий же, як і при синхронному способі вимірів.

Результати вимірів зображують у вигляді променевих діаграм-променів, що з'єднують генератор і приймач з указаними на них коефіцієнтами екранування: $\varepsilon = E_H / E$, де E_H – норма-

льне поле передавача в уміщувальних породах, E – виміряне поле. Нормальне поле передавача E_H розраховується за формулою:

$$E_H = E_0 e^{-bR} k,$$

де R – відстань до точки виміру; E_0 – напруженість поля поблизу передавача (при $R \rightarrow 0$); k – коефіцієнт установки, який залежить тільки від взаємного розміщення антен; b – коефіцієнт поглинання.

Коефіцієнт поглинання вміщувального середовища попередньо визначається під час дослідних робіт на ділянці, де спостерігається однорідність вміщувального середовища. Питання про аномальність коефіцієнта вирішується для кожного району робіт окремо залежно від питомого опору рудних об'єктів і рудовміщувальних порід.

Найбільш простим способом *інтерпретації* даних МРХП є тінювий, в якому за виміряними сигналами та коефіцієнтами екранування (відношеннями вимірюваного поля до нормального поля в уміщувальному середовищі) виділяються радіотіні, зумовлені поглинанням хвиль провідними включеннями. Положення провідного об'єкта визначають способом засічок по променях, що обмежують зону тіні (рис. 9.2, а).

Часто співставлення променевих діаграм та графіків напруженості поля, отриманих на різних частотах, дозволяють уточнити положення тінювої зони, оскільки зменшення довжини хвилі (підвищення частоти) приводить до поліпшення чіткості визначення границь тінювої зони, але при цьому дальність просвічування зменшується.

Областю застосування методу радіохвильового просвічування є розвідка рудних родовищ, зокрема виділення безрудних просторів між виробками або свердловинами; оконтурення розкритих виробками або свердловинами рудних покладів; пошуки сліпих рудних тіл у просторах між свердловинами та між гірничими виробками; виявлення об'єктів високого опору – пегматитових кварцових жил, карстових порожнин та ін.

9.4. Георадарне зондування

Георадарне зондування (ГРЗ), яке називається також *радіолокаційним зондуванням* або *радіолокаційним методом підповерхневого зондування*, ґрунтується на посиленні в землю коротких

(від 1нс до 1мкс) радіо- або відеоімпульсів і реєстрації сигналів, відбитих від границь поділу шарів із різними електромагнітними властивостями.

Радіолокатори (георадари) для зондування в землі працюють в діапазоні частот 10 МГц – 3 ГГц, і, як свідчить практика, вони забезпечують глибинність дослідження до 10 – 30 м із визначенням основних характеристик досліджуваного середовища, пов'язаних зі змінами електромагнітних властивостей середовища ϵ , μ , γ . На сучасному етапі найбільш широко застосовуються георадари типу Зонд-10, ОКО та ін.

Георадар Зонд-10 Ризького НВО "Радар" являє собою комбінований прилад, що об'єднує генераторну та вимірювальну частини в одному корпусі.

Генераторна частина приладу забезпечує збудження зондувальних імпульсів в генераторній антені на двох частотах – 75 і 150 МГц. Зондувальний сигнал має 1,5 періода коливань. Частота випромінювання імпульсів – 10 кГц. Різним частотам зондувального імпульсу відповідають антени різної довжини. Довжина антени повинна бути кратною $1/4$ довжини хвилі в повітрі λ_0 . У приладі Зонд-10 застосовуються антени з розмахом при частоті 75 МГц ($\lambda_0 = 4$ м) – 2 м, а при частоті 150 МГц ($\lambda_0 = 2$ м) – 1 м.

Вимірювальна частина приладу забезпечує прийом відбитих хвиль (трас) за допомогою приймальної антени, часове автоматичне регулювання підсилення (ЧАРП), стробування та цифрування сигналу. Результати вимірів виводяться на дисплей, записуються на ОЗП і можуть безпосередньо виводитися й записуватися на жорсткий диск комп'ютера.

Через велику складність створення АЦП із гігагерцовою частотою дискретизації для отримання результативної траси в георадарі використовується принцип стробування. На кожній трасі (часовий процес відгуку на один збуджувальний імпульс) знімається значення амплітуди, що відповідає одній часовій затримці. Цифрування виконується на часових затримках t_i , що дорівнюють $t_i = (i-1) \cdot 100 \text{ мкс} + i \cdot T_{\text{розг}} / 512$, де $i = 1, \dots, 512$, $T_{\text{розг}}$ – час розгортки, 512 – число відліків для цифрування однієї результативної траси (рис. 9.3). Стробування сигналу забезпечується блоком керування й синхронізації. Таким чином, одна

результативна радаротраса отримується після випромінення та стробування 512 імпульсів.

У георадарі передбачена корекція амплітуд двох видів. По-перше, це зміна коефіцієнта підсилення (як єдиного множника) для всіх відліків траси (уздовж осі часу) і по профілю (для всіх трас). По-друге, це введення динамічного підсилення, коли коефіцієнт підсилення зростає зі збільшенням часу вздовж траси. ЧАРП забезпечує малий коефіцієнт підсилення в ранній час й автоматичне збільшення коефіцієнта підсилення пізніше. Це необхідно для стиснення динамічного діапазону та вирівнювання амплітуд, тому що амплітуда сигналу на радаротрасі згасає за експоненціальним законом.

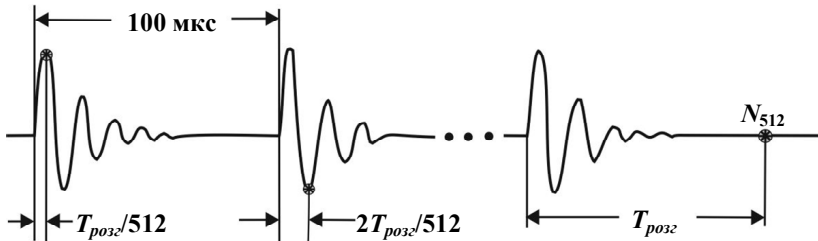


Рис. 9.3. Цифрування результативної траси в георадарі

Через високий частотний діапазон теорія електромагнітних хвиль, яка використовується в методі ГРЗ, носить хвильовий характер і нагадує теорію поширення пружних хвиль у сейсморозвідці. А тому результати зондувань георадарами більш схожі з даними, отриманими за результатами сейсмічних досліджень. Кінематична аналогія електромагнітних хвильових і сейсмічних полів дозволяє застосовувати до експериментальних даних георадарних зондувань відомі методи обробки сейсмічних сигналів, які включають обов'язкову побудову часових розрізів. *Часові розрізи* являють собою радарограми, побудовані в кожній точці профілю з відкладенням часу t після посилання електромагнітного імпульсу вздовж вертикальної осі (рис. 9.4).

На часових розрізах виконують кореляцію хвиль, відбитих від границь із різними електромагнітними властивостями. Оцінка глибини h до відбивних границь може бути здійснена за

формулою: $h = 0,5\sqrt{V^2t^2 - d^2}$, де $V = V_0/\sqrt{\mu_r\epsilon_r}$ – швидкість поширення електромагнітного поля в середовищі (V_0 – швидкість світла; μ_r, ϵ_r – відносні магнітна та діелектрична проникності середовища); d – відстань між антенами георадара. Враховуючи, що верхня частина розрізу практично немагнітна ($\mu_r=1$), для визначення швидкості V необхідно знати лише відносну діелектричну проникність ϵ_r . Її отримують за даними параметричних спостережень на свердловинах або ж безпосередніми вимірами у свердловинах (діелектричний каротаж).

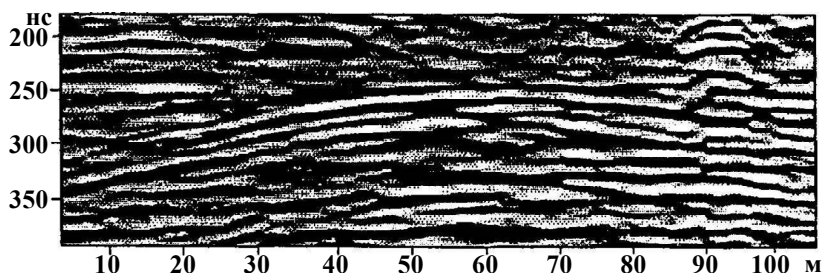


Рис. 9.4. Часовий розріз за результатами георадарної зйомки

У верхній частині часового розрізу, зображеного на рис. 9.4, відмічається чітка кореляція електромагнітних хвиль, відбитих від поверхні ґрунтових вод. Час реєстрації відбиттів складає 250 – 310 нс. Розрахунки показують, що при $\epsilon_r = 10$ глибина до поверхні рівня ґрунтових вод складає біля 11 м.

Не дивлячись на те, що кінематична аналогія між високо-частотними електромагнітними та сейсмічними полями, безперечно, є, проте, на жаль, у провідних середовищах згасання електромагнітного поля з глибиною більш суттєво впливає на глибинність зондувань, ніж при сейсмічних дослідженнях.

Питання для самоконтролю

1. Дайте визначення електророзвідки та охарактеризуйте її особливості.
2. Що таке геоелектричний розріз? Типи горизонтально-шарового розрізу та його узагальнені характеристики.
3. Охарактеризуйте нормальні поля точкового джерела, заземленої лінії та диполя.
4. Охарактеризуйте природні електричні поля та їх типи.
5. Охарактеризуйте електричне поле викликаного поляризації та механізми його виникнення.
6. Дайте загальну характеристику гармонійних електромагнітних полів.
7. Дайте визначення плоского гармонійного поля. Імпеданс та його фізична суть, скін-ефект і потужність скін-шару.
8. Охарактеризуйте нормальні гармонійні електромагнітні поля дипольних джерел.
9. Особливості радіохвильових полів.
10. Дайте загальну характеристику неусталеного поля дипольних джерел у провідному середовищі та можливості його використання для визначення електропровідності.
11. Охарактеризуйте магнітотелуричні та природні змінні в часі електромагнітні поля.
12. Охарактеризуйте сутність природних імпульсних електромагнітних полів Землі.
13. Класифікуйте методи електророзвідки.
14. Охарактеризуйте особливості електророзвідувальної апаратури та способи вимірів електричних сигналів.
15. Охарактеризуйте датчики електромагнітного поля, генераторні та вимірювальні пристрої, спеціалізацію електророзвідувальної апаратури за групами методів.
16. Опишіть суть методів опору. Що таке позірний опір? Назвіть принципову відмінність між електричним профілюванням та зондуванням.
17. Охарактеризуйте метод вертикального електричного зондування: загальну характеристику та методику робіт.

18. Охарактеризуйте експериментальні та теоретичні криві ВЕЗ, їх типи асимптоти та еквівалентність.

19. Охарактеризуйте якісну та кількісну інтерпретацію кривих ВЕЗ, геоелектричні побудови.

20. Наведіть типи дипольних установок. Дайте характеристику дипольним електричним зондуванням.

21. Охарактеризуйте різні модифікації електричних профілювань та способи інтерпретації результатів.

22. Охарактеризуйте метод зарядженого тіла при вирішенні задач рудної геології та гідрогеології.

23. Охарактеризуйте метод природного електричного поля – суть, методику робіт, обробку та зображення результатів, інтерпретацію даних, область застосування.

24. Охарактеризуйте метод викликаної поляризації: його суть, методику, інтерпретацію даних, область застосування.

25. Дайте загальну характеристику методу магнітотелуричних зондувань – суть, методика та область застосування.

26. Охарактеризуйте методи телуричних струмів та магнітотелуричного профілювання.

27. Охарактеризуйте суть методу частотних електромагнітних зондувань, його модифікації, методику робіт та інтерпретацію даних.

28. Охарактеризуйте метод зондування становленням поля в дальній зоні: загальна характеристика, криві зондувань, їх якісна та кількісна інтерпретація, геоелектричні побудови.

29. Дайте загальну характеристику методу зондування становленням поля в ближній зоні.

30. Поясніть суть трансформації перехідних процесів способом "плаваючої площини".

31. Охарактеризуйте особливості використання методів низькочастотного індуктивного профілювання, наведіть їх класифікацію та поясніть суть.

32. Опишіть метод природного імпульсного електромагнітного поля Землі (ПЕМПЗ).

33. Дайте характеристику високочастотних (радіохвильових) методів електророзвідки.

Л і т е р а т у р а

Основна:

1. Якубовский Ю. В. Электроразведка / Ю. В. Якубовский, И. В. Ренард. – М.: Недра. – 1991.
2. Хмелевской В. К. Электроразведка / В. К. Хмелевской. – М.: Изд-во МГУ, 1984. – 420 с.
3. Матвеев Б. К. Электроразведка / Б. К. Матвеев. – М.: Недра, 1990. – 368 с.
4. Основы геофизики / [М. И. Толстой, А. П. Гожик, М. В. Ревата ін.] – К.: ВПЦ "Київський університет", 2006. – 446 с.
5. Основы геофизических методов разведки / [М. И. Толстой, Ю. В. Тимошин, А. В. Сухорада и др.] – К.: Вища школа, 1985. – 327 с.
6. Якубовский Ю. В. Электроразведка / Ю. В. Якубовский, Л. Л. Ляхов. – М.: Недра, 1982. – 381 с.
7. Жданов М. С. Электроразведка / М. С. Жданов. – М.: Недра, 1986. – 316 с.
8. Заборовский А. И. Электроразведка / А. И. Заборовский. – М.: Гостоптехиздат, 1963. – 463 с.
9. Электроразведка. Справочник геофизика : [в 2 книгах]. – М.: Недра, 1989.
10. Электроразведка. Справочник геофизика. – М.: Недра, 1980.
11. Электроразведка. Справочник геофизика. – М.: Гостоптехиздат. – т. III. – 1963.
12. Федынский В. В. Разведочная геофизика / В. В. Федынский. – М.: Недра, 1967. – 672 с.

Додаткова:

1. Огильви Л. А. Сборник задач и упражнений по курсу электроразведки / Л. А. Огильви, В. К. Хмелевской. – М.: Изд-во МГУ, 1964. – 204 с.
2. Электроразведка методом сопротивлений / ПОД. ред. В. К. Хмелевского, В. А. Шевнина. – М.: МГУ. – 1994.

3. Семенов А.С. Электроразведка методом естественного электрического поля / А. С. Семенов. – Л.: Недра, 1980. – 446 с.
4. Комаров В. А. Электроразведка методом вызванной поляризации / В. А. Комаров. – [2-е изд.] – Л.: Недра, 1980. – 391 с.
5. Блох И. М. Дипольное электропрофилирование / И. М. Блох. – М.: Государственное науч.-тех. изд-во л-ры по геологии и охране недр, 1957. – 192 с.
6. Сидоров В. А. Импульсная индуктивная электроразведка / В. А. Сидоров. – М.: Недра, 1985. – 192 с.
7. Бердичевский М. Н. Магнитотеллурическое зондирование горизонтально-однородных сред / М. Н. Бердичевский, В. И. Дмитриев. – М.: Недра, 1991.
8. Методы геофизики в гидрогеологии и инженерной геологии / [Н. Н. Горминов, Н. Н. Шарапанов, В. Н. Чубаров и др.] – М.: Недра, 1985. – 183 с.
9. Вольвовский Н. Я. Краткий справочник по полевой геофизике / Н. Я. Вольвовский, Н. Я. Кунин, Е. Н. Терехин. – М.: Недра, 1977. – 391 с.
10. Бондаренко В. М. Общий курс геофизических методов разведки / В. М. Бондаренко, Г. В. Демура, А. М. Ларионов. – М.: Недра, 1986. – 453 с.
11. Хархалис Н. П. Особенности проявления естественного импульсного электромагнитного излучения на оползневом склоне / Н. П. Хархалис // Геофизический журнал, 1994. – Т. 16, № 4. – С. 58 – 61.
12. Чебан В. Д. Метод природного импульсного электромагнитного поля Земли. Деякі аспекти застосування / В. Д. Чебан // Геофизический журнал, 2001. – № 4.
13. Бессмертный А. Ф. Решение инженерно-геологических задач на основании результатов наблюдений естественного импульсного электромагнитного поля Земли / А. Ф. Бессмертный, В. Н. Саломатин // Геофизический журнал, 1999. – Т. 21, № 1. – С. 119 – 126.

Додаток А

Правила користування сухими батареями, проводами і прийоми монтажу установок

При користуванні сухими батареями живлення слід виконувати наступні основні правила.

1. Батареї зберігати в сухому прохолодному місці, оберігаючи їх як від замерзання, так і від нагрівання сонячними променями. При роботі батареї завжди ставити на гумові килимки, під час дощу накривати брезентом, клейонкою або тентом.

2. У нормальному стані батареї 69-ГРМЦ-6, 29-ГРМЦ-13 повинні давати струм короткого замикання відповідно до 5 – 6 і 12 – 14 А.

Батареї вважаються непридатними до застосування, якщо струм короткого замикання складає відповідно менше 2 і 4 А. Перевірка повинна проводитися раз на тиждень за допомогою амперметра зі шкалою не менше 5 А.

У робочий комплект потрібно брати батареї, по можливості, з однаковим внутрішнім опором. Батареї з різко підвищеним опором необхідно виключати з комплекту. Частково використані батареї можна застосовувати в установках, що вимагають невеликих розрядних струмів.

3. При роботі не доводити силу струму до величин, що перевищують максимальний розрядний струм, який при послідовному й паралельному з'єднанні секцій батареї 69-ГРМЦ-6 не повинен перевершувати відповідно 0,5 і 1А, а для батареї 29-ГРМЦ-16 – 1 і 2 А.

4. Для підвищення напруги в лінії живлення батареї з'єднуються в послідовні (можливо, змішані) групи.

5. З метою економії батареї силу струму потрібно підвищувати не за рахунок збільшення напруги, а в основному за рахунок зниження опору ліній живлення.

6. Щотижня вимірювати напругу батарей як без навантаження, так і під навантаженням. При помітному зменшенні струму в часі батареї необхідно замінити.

При монтажу польових електрометричних установок та їх виробничому застосуванні слід виконувати наступні основні правила експлуатації:

1. Усі проводи, за винятком нових бухт заводського мотування, повинні зберігатися й перевозитися на котушках. Змотувати в бухти під час роботи дозволяється тільки відрізки довжиною не більше 50 – 100 м. При перемотуванні заводських бухт на котушки потрібно стежити, щоб проводи не закручувалися. Для цього застосовують спеціальні мотувальні верстати.

2. На збереження в складі проводи повинні здаватися тільки сухими й очищеними від бруду. На кожній котушці повинен бути покажчик із зазначенням довжини проводу в метрах і його призначенням.

3. Не дозволяється намотувати на одну котушку одночасно два й більше куски проводу. Неприпустимо також зв'язувати або скручувати проводи двох і більше ліній в один кабель.

4. Не змотувати провід на котушку мокрим. Якщо це неможливо, то при поверненні на базу просушити провід, розмотавши його з котушки.

5. При розмотуванні проводу не кидати його на землю безладно, а при перетягуванні або змотуванні не допускати утворення петель (закручень), що приводить до швидкого псування в цих місцях ізоляції та обриву стальної жили.

6. При роботі в залісеній або кам'янистій місцевості стежити за тим, щоб провід не чіплявся за пеньки, корені, дерева та кущі, не терся об гострі виступи каміння. При затримці проводу через зачеплення за вищезгадані предмети, ні в якому разі не застосовувати силу, не смикати провід, а акуратно звільнити його або розплутати вузол.

7. При перетинанні польовою установкою доріг не допускати переїзду проводу возами, тракторами, автомашинами. Для пропуску транспорту піднімати провід угору або підвішувати над дорогою.

8. При розмотуванні, змотуванні та перетягуванні проводу навантаження необхідно розподіляти рівномірно. Працівники, що тягнуть провід, повинні знаходитися один від одного на відстані не більше 200 – 300 м. Для проводу ГПСМП допускається перетягування інтервалами до 500 м.

9. При змотуванні ліній після закінчення робочого дня потрібно оглядати провід. Місця з ушкодженою ізоляцією негайно ремонтувати.

Ремонт проводів. При ушкодженні ізоляції місце ушкодження потрібно покрити одним-двома шарами ізоляційної стрічки. Кожний наступний виток повинен не менше ніж наполовину лягати на попередній виток. При цьому необхідно ізолювати також 2 – 3 см неушкодженого проводу з кожного боку від ділянки ушкодження.

Якщо оголилася металева жила, провід очищають від ізоляції на 0,5 – 0,7 см в обидва боки від місця ушкодження, змазують це місце гумовим клеєм і, коли клей підсохне, покривають гумовою стрічкою, знову намазують гумовим клеєм і намотують другий шар гумової стрічки. Поверх гумової стрічки намотують два-три шари ізоляційної стрічки, захоплюючи нею неушкоджений провід на 2 – 3 см із кожного боку ремонтованої ділянки.

Якщо на місці ушкодження сталеві жили виявилися розірваними, то попередньо їх притискають тонким мідним дротом, щоб кінці не проколювали ізоляцію.

Зрощування проводів. Для зрощування проводів їхні кінці оголюють на 5 – 7 см. Приклавши оголені кінці проводу один до одного серединами, зв'язують їх вузлом, а зовнішні кінці туго закручують. Ні в якому разі не слід "скушувати" сталеві дроти, тому що вони приймають на себе все механічне навантаження. Обжавши місце зрощування плоскогубцями, оголені частини проводів покривають двома шарами гумової стрічки з проклеюючим гумовим клеєм, а зверху обмотують ізоляційною стрічкою, як описано вище в правилах ремонту проводів.

Роз'ємні з'єднання. Для роз'ємних з'єднань проводів застосовуються спеціальні карболітові чи гумові вилки із вмонтованими в них гайками-буксами. У букси, за бажанням, можна угвинчувати гнізда або стрижні.

При використанні вилок зустрічаються два випадки: а) до вилки підходять два проводи, які потрібно приєднати окремо до двох стрижнів або гнізд (двополюсна вилка); б) до вилки підходить один провід, який потрібно приєднати одночасно до обох штирів або гнізд (однополюсна вилка).

У ряді випадків в одну буксу вилки вкручують стрижень, а в іншу – гніздо. Такі вилки дозволяють при з'єднанні двопроводових ліній зберігати полярність включення, а при однопроводових дають можливість робити з'єднання будь-яких ділянок схеми.

При монтажі роз'ємного з'єднання провід повинен входити у вилку ізолюваним. Кінець проводу зачищається на 1,5 – 2 см і згортається в петлю (петля повинна загортатися за годинниковою стрілкою в напрямку загвинчування штиря або гнізда в буксу). Петля підгортається під штир чи гніздо вилки. При монтажі однополюсної вилки металева жила розділяється на дві частини.

Визначення місць розриву жил проводу під ізоляцією. Для визначення наявності ушкодження проводу з розривом жили під ізоляцією провід "продзвонюється" за допомогою вимірювального приладу (мультиметра).

Виготовлення заземлень. Заземлення виготовляються із залізних (для лінії живлення) або мідних (для вимірювальної лінії) стрижньових електродів.

На коротких лініях застосовуються заземлення з одиночних електродів. Зі збільшенням розносів необхідно домагатися зменшення опору заземлення, для чого електроди завчасно з'єднуються у зв'язки з декількох електродів кожна.

Для виготовлення зв'язок застосовуються відрізки старого проводу ГПМП. Відстань між електродами у зв'язці повинна бути не меншою 2 – 3 кратної довжини електрода.

У місцях приєднання проводу до електрода він ретельно зачищається терпугом або шкіркою. Провід пропускається через отвір в електроді під натягом, кілька разів щільно обвивається довкола нього й затягується плоскогубцями. Місце з'єднання для надійності контакту та запобігання корозії ізолюється смоляною стрічкою.

У процесі польових робіт необхідно періодично перевіряти стан контакту у зв'язці.

До одного з крайніх електродів зв'язки приєднується відрізок проводу довжиною біля одного метра, кінець якого зачищається. За допомогою таких відрізків зв'язки з'єднуються одна з одною й приєднуються до проводів живильної або вимірювальної лінії. Іноді на кінці таких відрізків проводу одягаються з'єднувальні вилки.

Додаток Б

Вимоги до звіту з навчальної геофізичної практики

Звіт з навчальної геофізичної практики повинен містити наступні розділи: 1) вступ; 2) короткий геологічний нарис району практики; 3) методику геофізичних робіт; 4) результати геофізичних досліджень; 5) висновки; 6) список використаних джерел; 6) додатки.

У вступі вказуються: район практики, її терміни, перелічуються основні види робіт, виконаних бригадою, склад бригади, склад керівників, автори розділів звіту.

Короткий геологічний нарис повинен містити відомості про стратиграфію, тектоніку, геоморфологію, гідрогеологію та корисні копалини району практики. У спеціальному розділі цього нарису повинні бути зібрані відомості про фізичні властивості гірських порід і руд, що утворюють геологічний розріз.

Глава, присвячена опису методики та результатів геофізичних робіт, повинна складатися з підрозділів, причому для кожного методу, з яким знайомилися студенти в процесі практики, повинен бути свій розділ. У кожному розділі описуються: а) монтажна схема установки та характеристика приладів, б) методика польових спостережень, в) прийоми контролю за якістю польових спостережень, г) способи обробки й відображення результатів польових спостережень, д) результати польових спостережень та їх коротке геологічне тлумачення.

У висновку варто коротко навести основні результати виконаних геофізичних досліджень, висвітлити розуміння авторами звіту ролі й місця геофізичних методів у загальному комплексі геологічних картувальних і пошукових досліджень у районі практики.

У додатках повинні міститися наступні матеріали: а) первинні польові журнали, графіки, побудовані в польових умовах, та ін.; б) основні результативні карти та графіки (за винятком графічних матеріалів, що розміщені безпосередньо в тексті звіту).

Список використаних джерел, який завершує текстову частину звіту, повинен містити основні літературні й фондові (рукописні) матеріали, використані бригадою в процесі роботи над звітом.

Звіт підписується всіма його авторами та затверджується викладачем, що керує практикою.

Результати геофізичних спостережень подаються у вигляді трьох графічних документів: графіки спостереженого геофізичного параметра за окремими профілями, карти графіків та карти ізоліній по площі досліджень. При виконанні електричних зондувань графічні побудови повинні включати: кореляційні схеми кривих зондувань уздовж профілів, вертикальні розрізи позірною опорю, графіки сумарної поздовжньої провідності (при площових роботах – карти сумарної поздовжньої провідності), геоелектричні розрізи вздовж профілів.

Оформлення графічних документів виконується за наступними загальними правилами:

1. Для побудови графіка по осі абсцис відкладаються точки спостережень (підмети або відстань у м), а по осі ординат – значення спостереженого геофізичного параметра, отримані у відповідних точках. Нанесені в такий спосіб точки з'єднуються прямими лініями. Горизонтальний масштаб графіків приймається рівним масштабу звітних карт (масштабу зйомки), а вертикальний вибирається відповідно до точності вимірів. Для кращої наглядності графіка масштаб може бути змінений. У випадку, коли значення спостереженої величини змінюються в широких межах, масштаб по осі ординат вибирається логарифмічним. Під графіком зазвичай наноситься рельєф поверхні, що дозволяє якісно врахувати його вплив на вимірюваний геофізичний параметр, відзначається положення характерних елементів ландшафту, гірських виробок та ін. Під заголовком вказуються масштаби побудов, а також розміри, орієнтація й крок установки. Після виконання кількісної інтерпретації під графіком зображується геоелектричний (геологічний) розріз уздовж профілю.

2. Для побудови карти графіків на план (топооснову) наносяться лінії профілів, уздовж яких проводилися спостереження. На цих лініях, що служать осями абсцис, будуються графіки для кожного профілю. Вертикальний масштаб при цьому рекомендується (при можливості) підбирати таким чином, щоб графіки сусідніх профілів не перетиналися.

3. Карта ізоліній будується в такий спосіб: на план (топооснову) наносяться профілі й точки спостережень на них. Біля кожної точки виписується значення спостереженого геофізичного параметра. В отриманому полі чисел проводяться лінії рівних значень спостереженого параметра. Перетин ізоліній вибирається зазвичай відповідно до точності вимірів, яка визначається на етапі попередньої обробки матеріалів за даними контрольних спостережень. З метою більшої наочності карти зони між ізолініями іноді зафарбовують різними кольорами або по-різному заштриховують. Для полегшення орієнтування на карту наносяться в спрощеному вигляді елементи топографічної ситуації, а також результати геологічної інтерпретації матеріалів геофізичних досліджень.

Додаток В

Інструкція з техніки безпеки при виконанні електророзвідувальних робіт

Як джерело струму для живлення електророзвідувальних установок використовуються комплекти сухих батарей, переносні генератори потужністю перші сотні Вт та машинні генератори, змонтовані на автомобілях підвищеної прохідності (всюдиходах), потужністю 5 – 20 кВт при напрузі до 460 В кожний. Генератори можуть використовуватись при паралельному та по-слідковому з'єднаннях. У першому випадку напруга між вихідними клемми генераторної групи може змінюватися (залежно від умов роботи) від 100 до 460 В, у другому випадку – від 200 до 920 В.

Основними видами роботи генераторної групи є: а) живлення лінії *AB* в установках *AMNB* при відстані між заземленнями до 50 км; б) живлення струмового кола диполя при відстані між заземленнями до 4 км. У першому випадку робоча напруга може досягати до 920 В при силі струму до 25 А, у другому випадку – 460 В при силі струму до 50 А.

При роботі з електророзвідувальною станцією існує небезпека ураження струмом персоналу партії через недбале поводження з проводами, апаратурою та механізмами, порушення правил техніки безпеки.

Для уникнення нещасних випадків, пов'язаних з ураженням струмом, персоналу електророзвідувальної партії (у тому числі студентам, що проходять навчальну та виробничу практику), необхідно суворо дотримуватись наступних основних правил техніки безпеки, які є обов'язковими для виконання:

1. Персонал партії (включаючи студентів, що проходять навчальну та виробничу практику), безпосередньо зайнятий на роботах з електророзвідувальними станціями та апаратурою, зобов'язаний:

а) вивчити інструкцію з техніки безпеки при роботі з електророзвідувальною апаратурою;

б) знати правила техніки безпеки при роботі з електричним струмом високої напруги;

в) уміти надати першу допомогу потерпілому від ураження струмом.

2. Начальник партії (керівник практики) і геофізики-оператори (викладачі) зобов'язані ознайомити персонал партії (студентів) із вимогами єдиних правил безпеки при геологорозвідувальних роботах, а також із технікою роботи на генераторній групі (електророзвідувальній апаратурі), струмовій лінії *AB* та живильних заземленнях.

3. До роботи з електророзвідувальною станцією (електророзвідувальною апаратурою) можуть бути допущені тільки особи, які володіють необхідним мінімумом технічних знань, знайомі з правилами техніки безпеки, цією інструкцією та пройшли медичний огляд.

4. Кожний допущений до роботи з електророзвідувальною станцією (електророзвідувальною апаратурою) повинен пройти виробничий інструктаж й ознайомитися з інструкцією з техніки безпеки. Перевірка технічного мінімуму та знань правил техніки безпеки проводиться комісією в складі начальника партії (керівника практики) і геофізиків-операторів (викладачів). Результати перевірки фіксуються в протоколі.

5. Персонал електророзвідувальної партії, який працює з апаратурою, що знаходиться під напругою (оператори, телефоністи та ін.) повинен бути забезпечений індивідуальними захисними засобами: гумовими рукавичками та гумовими чоботами.

6. Захисні засоби, що видаються особам, безпосередньо зайнятим на роботі з електророзвідувальною станцією, необхідно періодично перевіряти щодо їх придатності. Використання

захисних засобів при роботах, не пов'язаних з обслуговуванням струмонесучих елементів, не допускається.

7. Генератори, корпуси апаратури та всі пристрої, що працюють зі струмом високої напруги, повинні бути надійно заземлені. Опір заземлення не повинен перевищувати 10 Ом. Якість заземлення повинна перевірятися на кожній новій точці роботи.

8. При виконанні робіт, що передбачають тривале облаштування струмових заземлень (комбіноване профілювання, методи зарядженого тіла й серединного градієнта), місця джерел струму повинні бути огорожені з виставленням щитів із чітким написом про заборону наближатися до установок особам, не зайнятим на цих роботах.

9. Про вмикання електричного струму оператор повинен попередити весь персонал, зайнятий на цей час на роботі. На заземленнях (крім заземлення "нескінченність") потрібно залишати не менше 2-х працівників.

10. Переїзд на профіль (також із профілю) можливий на автомашині, спеціально обладнаній для перевезення людей.

11. До початку робіт необхідно перевірити комплектність обладнання, допоміжних проводів і пікетів для заземлення, а також наявність і справність захисних засобів.

12. Перед початком польових робіт адміністрація електророзвідувальної партії (начальник партії і його заступник) зобов'язана через райдержадміністрації, селищні ради, правління аграрних підприємств повідомити мешканців сіл, на території яких будуть проводитися роботи, про можливість ураження струмом у випадку навмисного псування проводів. Якщо в районі роботи партії видається газета, у ній повинно бути зроблено відповідне оголошення.

13. Сторонні особи в кузов генераторної групи (ГГ) під час її роботи не допускаються.

14. Усі струмонесучі частини монтажу установки, не забезпечені спеціальною ізоляцією, повинні мати захисні кожухи, які під час роботи знімати забороняється.

15. Забороняється виконувати ремонт апаратури та монтаж схем, що знаходяться під напругою.

16. Монтажні проводи ГГ, прилади та обладнання мають утримуватись у чистоті.

17. Забороняється проводити підключення проводів під час роботи генераторів. Інструменти ГГ повинні мати ручки, покриті ізоляцією або виготовлені з ізоляційного матеріалу. У комплекті захисних засобів ГГ обов'язково повинні бути гумові рукавички й чоботи, які належить утримувати в чистоті та робочому стані.

18. Для перевірки роботи ГГ (контакторів, генераторів, осцилографа та інших вузлів і приладів) як навантаження слід використовувати баластний реостат. Використання заземленої лінії *AB* повинно супроводжуватися виконанням правил ТБ як і при штатній роботі установки.

19. Максимальна напруга (920 В) включається тільки після спеціального попередження персоналу, який знаходиться на лінії, у генераторній групі й польовій лабораторії. До включення максимальної напруги всі прилади та окремі частини ГГ повинні бути перевірені й відрегульовані на низьких напругах (100 – 200 В).

20. Генератори повинні бути негайно зупинені, якщо під час замірів були виявлені несправності схеми генераторної групи, контакторів або живильної установки. При виявленій несправності в живильному колі, яка допускає швидке її виправлення, струм генераторів може бути переключено на баластне навантаження.

21. Режим роботи ГГ (робоча напруга, сила струму й тривалість вмикання живильного кола) при роботі з установкою *AMNB* або дипольною установкою встановлюється оператором, який проводить вимірювання. Категорично забороняється вмикати струм генераторів у живильну лінію, а також збільшувати робочу напругу вище вказаної оператором без відповідного його розпорядження.

22. Робота генераторів при знятих захисних кожухах приводних ременів або карданного вала забороняється.

23. Усі струмонесучі частини пульта й місця включення струмових кондукторів польової лабораторії (ПЛ) повинні бути захищені від випадкового дотику та утримуватися в чистоті.

24. Управління роботою всієї установки здійснюється геофізиком-оператором, що виконує вимірювання. Перш ніж дати розпорядження про вмикання струму в живильну лінію, оператор повинен: а) підготувати апаратуру до вимірювань; б) проінструктувати весь персонал, своїх помічників і працівників про порядок виконання вимірювань; в) перевірити лінію *AB* на від-

сутність витоків струму; г) переконатися в закінченні робіт з облаштування заземлень.

25. При використанні напруги понад 200 В оператор повинен особливо ретельно перевірити справність живильної лінії та апаратури й попередити весь персонал, зайнятий у цей час у роботі, про вмикання високої напруги.

26. При аварії або виявленні несправностей в апаратурі, підводці та живильній лінії оператор зобов'язаний негайно перемкнути струм генераторів на баластне навантаження та при необхідності ремонту дати розпорядження про зупинку генераторів. Без дозволу оператора ремонт установки забороняється.

27. Оператор зобов'язаний знати, в яких умовах прокладена живильна лінія. На небезпечних ділянках, де можливе пошкодження або випадковий дотик до неї (на дорогах і т. ін.), на час вимірів необхідно виставити охорону або виконати укладання лінії так, щоб можливість дотику людей та тварин до живильної лінії була виключена. При перетині ґрунтових доріг провід повинен закопуватися в землю, а при перетині доріг із твердим покриттям провід повинен підвішуватися на стовпах висотою не нижче 4 м із виставленням попереджувальних знаків. Оператор зобов'язаний слідкувати за виконанням цього правила працівниками живильних ліній і вимагати від них оповіщення населення про можливість ураження струмом при розмотуванні та виконанні інших робіт на лінії. При перевірці живильної лінії на витoki забороняється користуватися напругою вище 100 В у вологу погоду і вище 300 В у суху погоду.

28. Забороняється проводити вимірювання з використанням напруги понад 200 В у випадку порушеної ізоляції, наявності витоків струму і під час грози.

29. Оператор зобов'язаний слідкувати за належним технічним станом ГГ і ПЛ і систематично, не рідше одного разу на тиждень, виконувати перевірку опору ізоляції струмопровідних частин від їх корпусів. При наявності витоків струму на корпус ГГ і ПЛ до їх усунення роботи повинні бути припинені.

30. Живильна лінія та її елементи повинні мати надійну ізоляцію, що перешкоджає витокam струму. Перевірка відсутності витоків струму повинна проводитися перед кожним виміром на новому

розносі лінії (після нарощування проводу). Застосування проводів із пошкодженою ізоляцією забороняється.

31. Весь персонал, який обслуговує живильну та приймальну лінії, а також заземлення, зобов'язаний постійно стежити за якістю ізоляції проводів і надійністю заземлень та всіх з'єднань (з'єднання проводів, приєднання проводу до заземлень, з'єднання між окремими електродами заземлення і т. ін.). У комплекті працівника на лінії живлення, крім спеціального обладнання та необхідного інструменту, обов'язково повинні бути гумові рукавички й гумові чоботи, в яких він має виконувати роботу під час вимірів.

32. Перед початком роботи працівники на лінії живлення зобов'язані перевірити комплектність обладнання, належний стан радіостанцій або телефонних апаратів, допоміжних проводів й електродів для заземлення.

33. Установку заземлень повинні виконувати працівники на лінії живлення в повній відповідності з отриманим завданням.

34. Оскільки між живильною лінією й землею можливі напруги до 920 В, розділовий вхідний конденсатор у польовому телефоні типу ТА-57 повинен мати робочу напругу в 1000 В і пробивну напругу в 2000 В. Опір конденсатора перед початком робіт перевіряється мегаомметром, він повинен складати не менше 2 МОм.

35. Після отримання команди оператора про початок вимірювань працівники повинні відійти від заземлень на відстань не менше 2 м і не підходити до них до отримання дозволу від оператора. Присутність сторонніх осіб під час проведення вимірювань поблизу заземлень забороняється.

36. При перевірці живильної лінії на витoki струму за допомогою відключення проводу від заземлень *A* і *B* та включення в лінію напруги (<100 – 300 В) кінці проводу повинні підніматися в повітря за допомогою пристосування, що ізолює працівника. При цьому працівник повинен бути одягнений у захисні (гумові) рукавички та чоботи.

37. Для витягування електродів заземлення з ґрунту необхідно застосовувати спеціальні ключі.

38. При послабленні посадки електродів заземлення в ґрунті за допомогою кувалди незайняті на цій роботі люди повинні знаходитись на безпечній відстані (не менше 10 м).

Надання першої допомоги потерпілим від електричного струму. Головною умовою успіху при наданні першої допомоги є швидкість звільнення потерпілого від дії струму.

1. Звільнити потерпілого від струму, створивши попередньо умови, що гарантують безпеку від ураження струмом самих рятувальників. Це виконується шляхом відкидання струмонесучого проводу за допомогою сухої дерев'яної жердини або відтягування потерпілого від джерела струму за одяг із використанням захисних засобів (гумові рукавиці та чоботи).

Першою дією повинно бути швидке вимкнення тієї частини установки, якої торкається потерпілий. Якщо потерпілий може при цьому впасти з висоти, потрібно попередити або забезпечити його падіння. Якщо швидко відключити установку неможливо, необхідно відокремити постраждалого від струмопровідних частин.

При низькій напрузі для відокремлення потерпілого від струмонесучих частин або проводу від потерпілого необхідно скористатися сухою дерев'яною жердиною, дошкою, мотузкою, одягом або іншими сухими предметами, що не пропускають електричного струму. Забороняється користуватися в таких випадках металевими або мокрими предметами. Для відтягування потерпілого від струмонесучих частин можна також узятися за його одяг при умові, що він сухий і відстає від тіла, наприклад, за поли, не торкаючись при цьому до оточуючих металевих предметів і до частин тіла, не покритих одягом. Відтягнути потерпілого за ноги можна тільки за умови надійної ізоляції рук.

Рятувальник для ізоляції себе від землі й від тіла потерпілого може надіти гумові чоботи або калоші, стати на суху дошку або на яку-небудь суху непровідну для струму підстилку, на руки надягнути гумові рукавички або обгорнути свої руки прогумованою чи іншою ізолюючою матерією.

Перебіг струму, що проходить через людину в землю, можна перервати, відокремивши потерпілого від землі. При цьому необхідно дотримуватися зазначених вище заходів безпеки.

При необхідності слід перерубати або перерізати проводи (кожен окремо) сокирою з сухою дерев'яною ручкою або відповідним ізольованим інструментом, вживши заходів щодо ізоляції від землі.

При високій напрузі необхідно одягнути гумові боти та рукавички й діяти підручними предметами, що не проводять струм, для відділення потерпілого від струмопровідних проводів.

Якщо на повітряних лініях звільнення потерпілого від струму не може бути здійснено швидко та безпечно іншим способом, необхідно замкнути накоротко проводи.

2. Звільнити потерпілого від одягу, що заважає вільному диханню.

3. При непритомному стані слід оглянути порожнину рота потерпілого й видалити вставні щелепи, якщо вони в нього є.

4. Без зволікань, тут же на місці, приступити до надання першої долікарської допомоги.

5. Одночасно особа, що не зайнята наданням першої допомоги, зобов'язана: а) сповістити оператора станції про нещасний випадок; б) викликати швидку медичну допомогу; в) забезпечити доставку аптечки першої допомоги; г) видалити зі станції зайвих людей; д) забезпечити належне освітлення та надходження свіжого повітря.

6. Якщо потерпілий у свідомості, але до цього був у непритомному стані або тривалий час перебував під струмом, йому необхідно забезпечити повний спокій та постійне спостереження протягом 2 – 3 годин до прибуття лікаря. При неможливості швидкого виклику лікаря необхідно терміново доставити потерпілого до лікувальної установи.

7. При несвідомому стані потерпілого його слід обережно покласти на м'яку підстилку, розстебнути пояс й одяг, забезпечити приплив свіжого повітря, вилучити зайвих людей. Потерпілому необхідно дати понюхати нашатирний спирт із ватки, окропити його водою (не з рота), розтерти та зігріти тіло чистим сукном, тепло вкрити. Терміново викликати лікаря.

8. Якщо потерпілий погано дихає – дуже рідко й судорожно, як вмираючий, необхідно зробити штучне дихання.

9. Якщо рот непритомного міцно стиснутий, слід його розкрити, для чого необхідно висунути нижню щелепу: потрібно вставити в рот потерпілого чотири пальці обох рук під кутом до нижньої щелепи, великими пальцями впертися в її край і висунути щелепу вперед так, щоб нижні зуби були розташовані попереду верхніх.

Якщо не вдається розкрити рот таким способом, слід вставити між задніми корінними (у кутку рота) зубами обережно, щоб не зламати їх, дощечку, металеву пластинку, ручку ложки та розтиснути зуби.

10. При відсутності ознак життя (дихання, серцебиття, пульсу) не можна вважати потерпілого мертвим. Смерть часто буває клінічна (уявна). Визнати потерпілого мертвим може тільки лікар.

11. При рятуванні уявно померлого (людина не дихає) важлива кожна секунда, тому першу допомогу *вищевказаними заходами щодо штучного дихання* потрібно надавати негайно та безперервно, тут же на місці. Переносити постраждалого в інше місце можна, як виняток, тільки в тих випадках, коли небезпека продовжує загрожувати потерпілому або людям, що надають допомогу. Штучне дихання необхідно проводити до позитивного результату (оживлення) або до появи явних ознак справжньої смерті (появи трупних плям або трупного задубіння).

12. Коли потерпілий почне дихати самостійно, продовження виконання штучного дихання шкідливе, але якщо дихання знову почне слабшати або припинятися, негайно слід відновити штучне дихання.

13. Для допомоги постраждалому застосовують два способи штучного дихання:

Перший спосіб застосовується, коли допомогу надає один рятувальник. Для цього необхідно покласти постраждалого на живіт, головою на одну руку, обличчям убік, підстеливши що-небудь під людину. Іншу руку витягнути вперед, витягнути язик, але тримати його не потрібно. Стати на коліна над потерпілим зверху обличчям до його голови так, щоб стегна постраждалого були між колінами рятувальника. Покласти свої долоні на спину потерпілого, на нижні ребра, обхопивши їх із боків складеними пальцями. Рахуючи "раз", "два", "три", поступово нахилити своє тіло, налягаючи його вагою на витягнуті руки і натискаючи на нижні ребра постраждалого (видих). Не відриваючи рук від спини постраждалого, відкинутися назад (вдих).

Порахувавши "чотири", "п'ять", "шість", знову поступово, не поспішаючи, налягти вагою свого тіла на витягнуті руки, рахуючи "раз", "два", "три" і т. д. При переломі ребер та при опіках спини цей спосіб не можна застосовувати.

14. *Другий спосіб* штучного дихання полягає в наступному: якщо є помічники, покласти потерпілого на спину, підстеливши що-небудь тепле та підклавши під лопатки згорток, щоб голова закинулася, розкрити й очистити рот, вийняти вставну щелепу (якщо вона є у потерпілого), витягнути й утримувати язик. Стати на коліна над головою постраждалого, обхопити його руки біля ліктя і, рахуючи "раз", "два", "три", підняти руки потерпілого та закласти їх за його голову (вдих). Рахуючи "чотири", "п'ять", "шість", злегка притиснути руки до боків (видих) і т. д.

При правильному виконанні штучного дихання з'являється звук (подібний на стогін) від проходження повітря через дихальні шляхи потерпілого, коли грудна клітина стискається й опускається. Відсутність звуків говорить на те, що язик запав та заважає проходженню повітря.

При наявності двох помічників штучне дихання роблять двоє, кожний за одну руку, злагоджено, за рахунком, третій тримає витягнутий язик.

При переломі руки або ключиці *другий спосіб* не застосовується.

При всіх способах штучного дихання необхідно уникати надмірного здавлювання грудної клітки, оскільки може статися перелом ребра, а також видавлювання зі шлунка їжі й закупорка нею дихальних шляхів. Неприпустимо також робити руками потерпілого грубі та різкі рухи, щоб уникнути переломів і вивихів.

15. Якщо потерпілий опритомнів, його необхідно покласти в постіль, укрити, зігріти, напоїти теплим чаєм. Дати валеріанової настоянки (15 – 20 крапель).

16. Кожен, навіть легко потерпілий від дії струму, повинен бути в найближчі години доставлений до лікаря для подальшого лікування та спостереження.

17. При ураженні електричним струмом часто виникають опіки тіла потерпілого. Перша допомога при опіках полягає в наступному: легкі опіки перев'язати як рану незараженим матеріалом із перев'язувального пакета (аптечка). При важких значних опіках потерпілого не роздягати, не видаляти прилиплих частин одягу, зробити над носилками полог із брезенту, спецівок і т. п., що не торкається тіла. Зігріти та напоїти. негайно забезпечити його лікарською допомогою.

Додаток Г

Коротка інструкція із експлуатації комплексу електророзвідувальної апаратури ЕРП-1

1. Підготовка комплексу до роботи.

1.1. Витягнути складові частини комплексу з футляра та провести їхній зовнішній огляд. Провести перевірку електродів й електророзвідувальної установки для їх підключення.

1.2. Встановити генератор, вимірювач і комутатор (якщо він входить до складу комплексу) у робоче положення з дотриманням правил безпеки.

1.3. З'єднати складові частини комплексу за допомогою кабелів, що входять у комплект поставки, згідно зі схемами з'єднання, наведеними в інструкції по експлуатації апаратури.

1.4. Підключити ЕОМ до комутатора або вимірювача при роботі комплексу під управлінням ЕОМ.

1.5. Установити в ґрунт живильні та приймальні електроди або багатоелектродну систему в місцях, визначених методикою проведення геофізичних досліджень.

1.6. Підключити приймальні електроди до входів M_1 і N_1 або M_2 і N_2 вимірювача, живильні електроди – до входів A_1 і B_1 (A_2 і B_2) генератора. При роботі комплексу з багатоелектродною установкою з'єднувач підключити до комутатора або вимірювача зі вбудованим комутатором.

1.7. Включити живлення ЕОМ при роботі комплексу під управлінням ЕОМ та завантажити необхідне програмне забезпечення.

2. Підготовка до роботи генератора струму.

2.1. Для включення живлення генератора необхідно переключити тумблер "Робота/Заряд" у положення "Робота" і натиснути кнопку "Вкл. пит". Після включення живлення відбувається перевірка стану зарядженості акумуляторів приладу, про що на рідинно-кристалічний індикатор (РКІ) виводиться відповідне повідомлення.

2.2. Якщо акумулятори приладу розряджені, на РКІ виводиться повідомлення про недостатній рівень зарядки акумуляторів. Після відпускання кнопки "Вкл. пит" живлення генерато-

ра автоматично відключається. Під час роботи генератора проводиться контроль стану зарядженості блока акумуляторів. Якщо рівень розрядки акумуляторів більший, ніж 50% від початкової ємності, з'являється мигання символу "Б" у нижньому рядку РКІ, при рівні розрядки більшому ніж 75% постійно світиться символ "Б". При повній розрядці акумуляторів прилад буде автоматично вимкнений.

2.3. Призначення кнопок клавіатури генератора:

- "Старт" – увімкнення генератора (подача вихідної напруги на клеми для підключення живильних електродів);
- "Стоп" – вимкнення генератора (припинення подачі вихідної напруги на клеми для підключення живильних електродів);
- "-F" – зменшення частоти вихідного сигналу генератора;
- "+F" – збільшення частоти вихідного сигналу генератора;
- "-I" – зменшення сили струму генератора;
- "+I" – збільшення сили струму генератора;
- "ВП" – включення/відключення підсвічування РКІ;
- "I_{изм}" – індикація поточної сили струму;
- "U_{изм}" – індикація поточної напруги на вихідних клеммах генератора;
- "Вылк" – вимкнення живлення генератора.

Увімкнення генератора (подача струму в навантаження) проводиться при натисканні клавіші "Старт". Індикація поточної сили струму та напруги на вихідних клеммах генератора відбувається при натисканні та утриманні клавіш "I_{изм}" або "U_{изм}" відповідно. Вимкнення генератора (припинення подачі струму в навантаження) відбудеться при натисканні на клавішу "Стоп".

2.4. Якщо на вихідних клеммах присутня напруга вища максимально допустимого значення (при значенні опору навантаження вищого від верхньої межі діапазону допустимих опорів), включається звуковий сигнал, при цьому на РКІ виводиться відповідне повідомлення.

Для генератора ЕРП-1 максимально допустиме значення напруги на вихідних клеммах генератора складає 300 В. Якщо напруга на вихідних клеммах не зменшується нижче максимально допустимого значення протягом 1 с, генератор автоматично переводиться у вимкнений стан, при цьому напруга з вихідних

клем знімається. Якщо напруга на вихідних клемах стає меншою від максимальної, звуковий сигнал вимикається, при цьому на РКІ виводиться відповідне повідомлення.

Якщо на вихідних клемах напруга складає менше 5 В або значення сили струму в навантаженні відрізняється від номінального більше ніж на 3%, умикається звуковий сигнал, при цьому на РКІ виводиться повідомлення, де в нижньому рядку відображається причина попередження: кз – коротке замикання в навантаженні або нс – порушення режиму стабілізації струму.

На з'єднувач "1 Ом" подається сигнал із резистора опором $(1 \pm 0,005)$ Ом, включеного послідовно з вихідними клемами генератора.

2.5. Вимкнення генератора виконується шляхом тривалого (близько 3 с) натискання на клавішу "Вык". Крім того, автоматичне вимикання приладу відбувається через 15 хвилин після відсутності активних операцій із генератором (ненатискання на будь-яку клавішу генератора), якщо генератор не знаходиться в стані подачі напруги на вихідні клеми. При цьому на індикатор приладу виводиться повідомлення про відключення живлення, і, якщо протягом 10 с після цього не буде натиснута жодна клавіша, генератор вимикається. Автоматичне вимкнення приладу відбувається також при виявленні розряду акумулятора нижче допустимого рівня.

2.6. У випадку, якщо напруга на внутрішніх контурах генератора вища безпечного рівня, перед вимиканням живлення приладу вводиться автоматична затримка до 30 секунд, про це виводиться повідомлення на РКІ. Зазначена часова затримка необхідна для забезпечення розрядки внутрішніх контурів генератора до безпечної напруги.

3. Підготовка до роботи вимірювача напруги.

3.1. Для включення живлення вимірювача тумблер "Робота/Заряд" необхідно встановити в положення "Робота" і натиснути кнопку "Вкл". Після включення відбувається перевірка зарядженості акумуляторів приладу. У випадку, якщо акумулятори приладу розряджені, на РКІ виводиться повідомлення про недостатній рівень зарядки акумуляторів, потім після відпускання кнопки "Вкл" живлення вимірювача автоматично вимикається.

Під час роботи вимірювача здійснюється контроль рівня зарядженості акумуляторів. Якщо рівень розрядки акумуляторів більший 50% від початкової ємності, відбувається мигання символу "Б" у верхній частині РКІ, для індикації розрядки акумуляторів більше ніж на 75% – постійно включений символ "Б". У випадку виявлення повної розрядки акумуляторів прилад буде автоматично вимкнений.

3.2. Після включення живлення на РКІ виводиться повідомлення, де у верхньому рядку відображаються:

- "K₁ 1" і "K₂ 4" – значення коефіцієнтів передачі;
- "F₄" – робоча частота приладу;
- стан вимірювача – два символи праворуч від поля робочої частоти приладу. При цьому вказані символи можуть приймати наступні значення: а) відсутність символів у полі стану вимірювача – дані з пам'яті вимірювача; б) "из" – проводиться вимірювання напруги; в) "гт" – вимірювання завершено; д) "пп", "нт" або "нв" – при вимірюванні виявлено помилки: "пп" – вихід вимірюваної напруги за верхню межу діапазону, "нт" – вихід вимірюваної напруги за нижню межу діапазону, "нв" – недостатній час вимірювання. При виявленні помилки включається також звуковий сигнал;
- рівень розрядки акумуляторів – символ "Б" праворуч від поля стану вимірювача;
- значення напруги у мВ (у випадку, якщо вимірювання напруги не проводилися, на РКІ у полі значення напруги виводиться код невимірюваної напруги у вигляді шести символів "х");
- у нижньому рядку відображаються: номер поточного планшета ("n000"), праворуч від номера планшета ознака закритого (символ "п") або стертого (символ "с") планшета, координати точки на планшеті.

Вимірювач може працювати у двох режимах індикації: у режимі індикації номера планшета та поточних координат точки на планшеті і в режимі індикації вимірюваної фази вхідного сигналу й проміжного значення напруги, збереженого в пам'яті в процесі вимірювань при натисканні клавіші "ЗАП".

Для зміни режиму індикації служить клавіша "ІНД". Поточний режим індикації запам'ятовується при вимкненні живлення

вимірювача, при повторному увімкненні живлення вимірювач автоматично перейде в режим індикації, який був вибраний перед попереднім вимкненням живлення приладу.

3.3. Призначення клавіш вимірювача залежить від режиму роботи й режиму індикації вимірювача.

3.3.1. Клавіші "1"/"K₁", "2"/"K₂" і "3"/"F" служать для індикації та зміни значення коефіцієнтів передачі K₁ і K₂ і значення робочої частоти вимірювача. Вивід значень коефіцієнтів передачі або частоти на РКІ відбувається при натисканні на відповідну клавішу, зміна значень – при тривалому (більше 1 с) утриманні відповідної клавіші в натиснутому стані.

3.3.2. Клавіші "4", "5" і "6" у режимі індикації номера й поточних координат точки на планшеті у вимірювачі ЭРП-1 служать для виведення на РКІ і зміни значення координати x: клавіша "4" служить для зменшення на 1, "5" – для збільшення на 1, "6" – для виведення значення координати x у метрах.

При зміні координати відбувається зчитування з пам'яті значення напруги, збереженої раніше в даній точці. У режимі індикації фази вхідного сигналу клавіша "4" служить для індикації поточної дати й часу, клавіша "5" не використовується, призначення клавіші "6" не змінюється.

3.3.3. Клавіші "7", "8" і "9" у режимі індикації номера й поточних координат точки на планшеті служать для виведення на РКІ і зміни значення координати, що відповідає номеру розносу (АВ – для вимірювача ЭРП-1): клавіша "7" – для зменшення на 1, клавіша "8" – для збільшення на 1, клавіша "9" – для виведення значення в метрах зазначеної координати точки на планшеті.

У режимі індикації фази вхідного сигналу клавіша "7" служить для виведення на РКІ значення добротності смугового фільтра вимірювача, клавіша "8" – для зміни кількості відображуваних розрядів в отриманому результаті вимірювання, призначення клавіші "9" не змінюється.

3.3.4. Клавіша "С"/"КП" у режимі запису даних вимірювань у пам'ять вимірювача служить для закриття останнього незакритого планшета. Після натискання на цю клавішу на індикатор виводиться запит на підтвердження закриття планшета. Після підтвердження (натискання клавіші "0") на індикатор ви-

водиться повідомлення про максимальне значення координати x_{\max} , для якої проводився запис даних і повторний запит на підтвердження закриття планшета.

Після повторного підтвердження планшет буде закритий, тобто стирання стане неможливим. Однак при цьому залишається можливість записувати або змінювати інформацію в конкретному планшеті, якщо така операція дозволена в процедурі зміни конфігурації вимірювача. У режимі програмування вимірювача клавіша "С"/"КП" служить для відмови від виконання операції програмування.

3.3.5. Клавіша "ВП" служить для включення та виключення підсвічування індикатора вимірювача.

3.3.6. Клавіша "ЗАП" служить для запам'ятовування значення вимірної напруги в енергонезалежній пам'яті приладу після закінчення виміру. Після запису даних у пам'ять відбувається автоматичне збільшення координати точки та зчитування з пам'яті значення напруги, збереженої раніше в точці з новими координатами. Якщо напруга в цій точці не вимірювалася, на індикатор виводиться код невимірної напруги ("xxxxxx"). Крім того, у процесі вимірювання зазначена клавіша використовується для запам'ятовування проміжного результату вимірювання.

3.3.7. Клавіші "цикл" та "ИЗМ" призначені для включення режиму вимірювання напруги. При цьому клавіша "ИЗМ" використовується для проведення одноразового вимірювання, а клавіша "цикл" – для проведення безперервного вимірювання. Зупинка процесу вимірювання в другому випадку проводиться за допомогою повторного натискання клавіші "цикл". Під час роботи в режимі вимірювання напруги на РКІ постійно виводиться поточне вимірне значення, після зупинки вимірювання або після закінчення одноразового вимірювання на індикатор виводиться значення напруги, обчислене за результатами вимірювань за останні 16 періодів вхідного сигналу. При вимірюванні можна запам'ятати поточне значення вимірюваної напруги шляхом натискання клавіші "ЗАП".

3.4. Режим програмування вимірювача.

3.4.1. Для переходу в режим програмування вимірювача призначена клавіша "П". Після натискання клавіші "П" на індикатор виводиться відповідне повідомлення. Для вимірювача ЭРП-1 передбачені наступні процедури програмування вимірювача:

0 – "Вибір планшета";

1 – "Введення координат";

- 2 – "Введення поточного часу і дати";
- 3 – "Вибір коефіцієнта передачі";
- 4 – "Введення коду невиміряної напруги";
- 5 – "Створення планшета";
- 6 – "Стирання пам'яті";
- 7 – "Передача даних у зовнішню ЕОМ";
- 8 – "Введення у вимірювач поправки або компенсації";
- 9 – "Калібрування вимірювача";
- 10 (клавіша "ЗАП") – "Зміна конфігурації вимірювача".

У нижньому рядку РКІ виводиться підказка про процедуру програмування, вибір наступного або попереднього рядка підказки проводиться шляхом натискання клавіш "←" або "→". Вибір необхідної процедури програмування проводиться натисканням на клавіатурі клавіші, що відповідає номеру процедури, або натисканням клавіші "П" у момент, коли на індикатор виводиться відповідний рядок підказки.

3.4.2. Процедура 0 – "Вибір планшета". Після вибору процедури на індикатор виводиться повідомлення, де в нижньому рядку знаходяться номери початкового, останнього та поточного планшетів. Для вибору нового планшета необхідно ввести його номер, натиснувши відповідні цифрові клавіші, після чого натиснути клавішу "П". Для виходу без зміни номера поточного планшета використовується клавіша "С".

3.4.3. Процедура 1 – "Введення координат". Зазначена процедура використовується для переходу до нової точки в поточному планшеті. Після вибору даної процедури на індикатор виводиться повідомлення, де в нижньому рядку вказані поточні координати (x, y, АВ – для вимірювача ЭРП-1. Введення нових координат точки здійснюється за допомогою цифрових клавіш, для переміщення курсора використовуються клавіші "←" і "→". Для переходу до нової точки необхідно натиснути клавішу "П", для виходу без зміни поточних координат – клавішу "С".

Примітка: Для вимірювача ЭРП-1 значення у завжди буде рівним 0, тому координата у у вимірювачі ЭРП-1 не використовується.

3.4.4. Процедура 2 – "Введення поточного часу і дати". Після вибору цієї процедури на індикатор виводиться повідомлення, де в нижньому рядку знаходиться поточний час і дата. Редагу-

вання значення часу й дати проводиться за допомогою цифрових клавіш і клавіш переміщення курсора. Для підтвердження нового значення необхідно натиснути клавішу "П", для виходу без зміни поточного часу і дати – клавішу "С".

Примітки: Після включення живлення вимірювач автоматично переводиться в режим введення дати й часу, при вимиканні живлення поточні значення дати й часу не зберігаються.

3.4.5. Процедура 3 – "Вибір коефіцієнта передачі". Виконання даної процедури залежить від варіанта виконання вимірювача. Для вимірювача ЭРП-1 ця процедура використовується для вибору коефіцієнта передачі вимірювального тракту приладу незалежно від його режиму роботи.

Після вибору даної процедури на індикатор виводиться повідомлення, де K_1 – коефіцієнт передачі вхідного каскаду вимірювача, K_2 – номер вимірювального каналу. K_1 може приймати значення 0 (коефіцієнт передачі вхідного каскаду дорівнює 10) або 1 (коефіцієнт передачі вхідного каскаду дорівнює 0,4). K_2 може приймати значення 0, 1, 2, 3 (ручний вибір конкретного каналу вимірювача) або 4 (автоматичний вибір каналу вимірювача). Введення нового коефіцієнта передачі здійснюється за допомогою цифрових клавіш і клавіш для переміщення курсора. Вихід із режиму без збереження проводиться при натисканні клавіші "С". Для збереження введеного значення необхідно натиснути клавішу "П".

Примітки: 1. Вибір діапазону значень вхідної напруги вимірювача може бути здійснено за допомогою клавіш " K_1 " і " K_2 " після виходу вимірювача з режиму програмування незалежно від режиму роботи вимірювача.

2. Мінімальні та максимальні значення діапазонів вхідних напруг для конкретного зразка вимірювача подаються в паспорті.

3.4.6. Процедура 4 – "Введення коду невимірюваної напруги". Процедура використовується для стирання в пам'яті результатів виміру в поточній точці. Після вибору даної процедури на індикатор виводиться запит на підтвердження. Після підтвердження запиту результати вимірювання в поточній точці будуть стерті.

3.4.7. Процедура 5 – "Створення планшета". Процедура до-ступна тільки за умови, що останній створений планшет закритий. Після вибору цієї процедури на індикатор виводиться

відповідне повідомлення. За "умовчанням" параметри планшета встановлюються аналогічними останньому закритому планшету.

Для зміни або перегляду параметрів планшета необхідно натиснути клавішу "0", для продовження без перегляду та зміни – клавішу "1". Після натискання на клавішу "0" на індикатор виводиться повідомлення, де в нижньому рядку знаходиться номер нового планшета (максимальний номер планшета – 060) і робоча частота вимірювача для створюваного планшета (00 – 0 Гц, 01 – 1,2207 Гц, 02 – 2,4414 Гц, 04 – 4,8828 Гц). Значення робочої частоти вимірювача можна змінити за допомогою цифрових клавіш і клавіш переміщення курсора "←" і "→". Для продовження необхідно натиснути клавішу "П", вихід із режиму без створення планшета здійснюється на будь-якому етапі при натисканні клавіші "С". Робоча частота вимірювача може бути змінена після створення планшета за допомогою клавіші "F".

Після натискання клавіші "П" на індикатор виводиться повідомлення, де Т – тип планшета (будь-яка цифра від 0 до 7 є необов'язковим параметром планшета, у роботі вимірювача не використовується, але може передаватися в зовнішню ЕОМ), АВ – кількість розносів АВ (1 – 99), крок розносів АВ змінюється від 0,5 до 25,5 м.

Після введення необхідних значень і натискання клавіші "П" на індикатор виводиться повідомлення, де АВ_{нач} – початковий рознос АВ (0,5 – 25,5 м), MN_{нач} – початковий рознос MN (0,5 – 25,5 м).

Після введення необхідного кроку по магістралі та натискання клавіші "П" на індикатор виводиться повідомлення про кількість точок на магістралі, визначеному виходячи з обсягу пам'яті для запису результатів вимірювань. Вихід із процедури створення планшета здійснюється шляхом натискання клавіші "П" і подальшого підтвердження запиту на збереження в пам'яті новоствореного планшета.

Якщо планшет із заданими параметрами створити в пам'яті вимірювача неможливо (наприклад, вільного обсягу пам'яті недостатньо), на РКІ буде виведено повідомлення про помилку, після чого вимірювач вийде з процедури створення планшета без виконання будь-яких дій.

3.4.8. Процедура 6 – "Стирання пам'яті". Процедура використовується для стирання з пам'яті всіх даних вимірювань або стирання даних останнього незакритого планшета. Після вибору

цієї процедури на індикатор виводиться відповідне повідомлення. Для продовження роботи необхідно натиснути клавішу "0" (стирання всієї пам'яті) або "1" (стирання останнього незакритого планшета), після чого на індикатор виводиться відповідний запит. Після повторного запиту відбувається стирання записаних в енергонезалежну пам'ять результатів вимірювань.

3.4.9. Процедура 7 – "Передача даних в ЕОМ". Після вибору процедури на індикатор виводиться повідомлення, де у верхньому рядку вказана поточна швидкість передачі даних послідовного порту вимірювача. Робота вимірювача в цьому режимі відбувається за командами, отриманими із зовнішньої ЕОМ, і супроводжується виведенням на індикатор пояснювальних повідомлень. Вихід із режиму здійснюється після натискання клавіші "С".

Примітка: 1. Підключення зовнішньої ЕОМ до вимірювача має здійснюватися при вимкненому живленні вимірювача й ЕОМ.

3.4.10. Процедура 9 – "Калібрування вимірювача".

Увага: під час калібрування каналу вимірювання напруги зовнішні ланцюги повинні бути відключені від вхідних клем вимірювача ЕРП-1!

Калібрування вимірювача проводиться окремо для постійної напруги (натискання клавіші "0") і для напруги з частотою 1,2207 Гц (натискання клавіші "1"), 2,4414 Гц (натискання клавіші "2"), 4,8828 Гц (натискання клавіші "4" або "3"). Крім того, у даній процедурі проводиться калібрування каналу вимірювання фази (натискання клавіші "9").

3.4.10.1 Калібрування каналу вимірювання напруги. Після вибору цієї процедури на індикатор виводиться відповідне повідомлення. Процедура проводиться для перевірки і, при необхідності, коригування калібрувальних коефіцієнтів вимірювача. Для продовження калібрування вимірювача після закінчення процедури в першому діапазоні вимірюваних напруг необхідно натиснути клавішу "П", щоб пропустити даний режим і перейти до калібрування в наступному діапазоні необхідно натиснути клавішу "1". Для виходу з режиму калібрування необхідно натиснути клавішу "С". Після переходу до калібрування вимірювача (після натискання клавіші "П") на індикатор починають виводитися дані вимірювань. Для закінчення вимірів необхідно натис-

нути клавішу "цикл". Після закінчення вимірювань на індикатор виводиться запит на збереження результатів калібрування й при підтвердженні цього запиту калібрувальні коефіцієнти вимірювача будуть змінені. Для продовження калібрування вимірювача в другому (а потім у третьому й четвертому) діапазоні вимірюваних напруг необхідно натиснути клавішу "П". На відміну від першого діапазону, калібрування в інших діапазонах вимірюваної напруги проводиться за двома точками. Після закінчення вимірювання значення напруги калібрувального сигналу в першій точці (закінчення виміру після натискання на клавішу "цикл" і подальшого натискання на клавішу "П") вимірювач переходить до вимірювання значення напруги другої точки. Після зупинки вимірювання в другій точці діапазону на індикатор буде виведений запит на збереження результатів калібрування.

Примітка: При проведенні калібрування приладу необхідно стежити за тим, щоб час вимірювання в кожній точці діапазону був достатнім для закінчення перехідних процесів після перемикавання калібрувальних сигналів.

3.4.10.2. Калібрування каналу вимірювання фази вхідного сигналу проводиться за результатами останнього вимірювання фази вхідного сигналу. При цьому вимірювана фаза приймається за "нуль". Калібрування проводиться окремо для кожної робочої частоти вимірювача та для кожного вимірювального каналу (тобто окремо для першого, другого, третього й четвертого діапазонів на частотах 1,2207, 2,4414, 4,8828 Гц). Після вибору даної процедури на індикатор виводиться запит на збереження результатів калібрування й при підтвердженні цього запиту калібрувальні коефіцієнти вимірювача будуть змінені.

Примітка: Калібрування каналу вимірювання фази неможливе, якщо попередні вимірювання фази вхідного сигналу проводилися в режимі з автоматичним вибором вимірювального каналу ($K_2 = 4$).

3.4.11. Процедура 8 – "Введення поправочних коефіцієнтів". Виконання процедури введення поправочних коефіцієнтів для вимірювача ЕРП-1 виконується окремо для кожної робочої частоти після проведення вимірювання напруги або фази вхідного сигналу до введення результатів даного вимірювання в пам'ять вимірювача. Після вибору даної процедури на індикатор

виводиться відповідне повідомлення. Вибір процедури введення поправочного коефіцієнта при вимірюванні напруги проводиться шляхом натискання клавіші "0", процедури введення компенсації постійної складової – клавіші "2", процедури введення по-правочного коефіцієнта при вимірюванні фази – клавіші "8". Відміна введених раніше поправочних коефіцієнтів і компенсації (окремо для кожної робочої частоти вхідного сигналу) проводиться при натисканні клавіш "1" (поправочного коефіцієнта при вимірюванні напруги), "3" (компенсації постійної складової) та "9" (поправочного коефіцієнта для виміру фази).

Примітка: Вибір необхідної процедури введення поправочних коефіцієнтів може бути здійснений також за допомогою клавіші "П" (аналогічно вибору процедур програмування).

Після вибору процедури введення поправочного коефіцієнта при вимірюванні напруги на індикатор виводиться відповідне повідомлення. Після введення необхідного значення напруги та натискання клавіші "П" на індикатор виводиться запит на збереження поправочного коефіцієнта і при підтвердженні цього запиту поправочний коефіцієнт буде зберігатися в енергонезалежній пам'яті вимірювача. Після вибору процедури введення компенсації постійної складової або поправочного коефіцієнта при вимірі фази на індикатор виводиться запит на збереження значення компенсації або поправочного коефіцієнта й при підтвердженні цього запиту відповідні значення будуть збережені в енергонезалежній пам'яті вимірювача.

Примітка: Після зміни калібрувальних коефіцієнтів (процедури 9 програмування) поправочні коефіцієнти для відповідної робочої частоти вимірювача будуть автоматично обнулені: після зміни калібрувальних коефіцієнтів для каналу вимірювання напруги – поправочний коефіцієнт для вимірювання напруги та компенсація постійної складової, після зміни калібрувальних коефіцієнтів для каналу вимірювання фази – поправочний коефіцієнт для вимірювання фази.

Після вибору режиму відміни поправочних коефіцієнтів або компенсації на індикатор буде виведено запит на підтвердження змін і при підтвердженні даного запиту поправочні коефіцієнти або значення компенсації для відповідної частоти будуть обнулені.

3.4.12. Процедура 10 – "Зміна конфігурації вимірювача". Вибір процедури для вимірювача ЕРП-1 проводиться за допомогою клавіші "ЗАП". Після вибору зазначеної процедури на індикатор виводиться відповідне повідомлення.

Меню програмування вимірювача ЕРП-1 включає наступні пункти: 1 – "Зміна швидкості передачі даних у зовнішню ЕОМ"; 2 – "Вибір порядку зміни значення АВ під час запису вимірюваної напруги в енергонезалежну пам'ять"; 3 – "Дозвіл редагування закритих планшетів"; 4 – "Зміна періоду індикації при вимірі"; 6 – "Вибір режиму роботи вимірювача". Вибір необхідного пункту меню зміни конфігурації вимірювача здійснюється аналогічно вибору режимів програмування.

3.4.12.1. Зміна швидкості передачі даних (пункт 1). Після вибору цього пункту меню на РКІ виводиться повідомлення про поточні швидкості передачі даних послідовного порту вимірювача. Вибір необхідного значення швидкості проводиться за допомогою клавіш "←" або "→". Вихід здійснюється за допомогою клавіш "П" (вихід зі збереженням змін) або "С" (вихід без збереження змін).

Примітка: Значення швидкості передачі даних послідовного порту не зберігається в незалежній пам'яті вимірювача ЕРП-1. Після включення живлення швидкість обміну послідовного порту вимірювача ЕРП-1 завжди встановлюється рівною 9600 біт/с.

3.4.12.2. Вибір порядку зміни значення координати АВ під час запису значень вимірюваної напруги в енергонезалежну пам'ять (пункт 2). Після вибору цього пункту меню на РКІ виводиться повідомлення про поточний порядок зміни значення координати АВ. Зміна значення координати АВ під час запису в пам'ять результатів вимірювань може проводитися таким шляхом: збільшення; зменшення; збільшення для парних і зменшення для непарних значень координати x ; зменшення для парних і збільшення для непарних значень координати x . Вибір необхідного порядку зміни значення координати АВ проводиться за допомогою клавіш "←" або "→". Вихід здійснюється за допомогою клавіш "П" (вихід зі збереженням) або "С" (вихід без збереження змін).

3.4.12.3. Дозвіл редагування закритих планшетів (пункт 3). Після вибору цього пункту меню на рідинно-кристалічний інди-

катор (РКІ) виводиться повідомлення про дозвіл або заборону запису в закритий планшет. Зміна дозволу на редагування закритих планшетів проводиться за допомогою клавіш "←" або "→". Вихід здійснюється за допомогою клавіш "П" (вихід зі збереженням) або "С" (вихід без збереження змін).

3.4.12.4. Зміна періоду індикації при вимірах (пункт 4). Після вибору цього пункту меню на РКІ виводиться повідомлення про поточний період індикації. Вибір необхідного періоду індикації проводиться за допомогою клавіш "←" або "→". Вихід здійснюється за допомогою клавіш "П" (вихід зі збереженням) або "С" (вихід без збереження змін).

3.4.12.5. Вибір режиму роботи вимірювача (режим 6). Вимірювач ЕРП-1 може працювати у двох режимах: а) звичайний режим (ЕРП-1); б) управління комутатором СОМх64. Переключення режимів роботи у вимірювачі здійснюється в пункті меню 6 зміни конфігурації вимірювача. Після вибору цього пункту меню зміни конфігурації на РКІ виводиться повідомлення про поточний режим роботи вимірювача. Вибір необхідного режиму роботи вимірювача проводиться за допомогою клавіш "←" або "→". Вихід здійснюється за допомогою клавіш "П" (вихід зі збереженням) або "С" (вихід без збереження змін).

Режим роботи – "Управління комутатором СОМх64" є додатковим режимом роботи вимірювача ЕРП-1 і призначений для роботи комплексу ЕРП-1 спільно з комутатором СОМх64. Після вибору вказаного режиму роботи вимірювач проводить перевірку інтерфейсу зв'язку з комутатором СОМх64, потім виводить на індикатор повідомлення, де в нижньому рядку приводиться номер поточного планшета (xxx), повідомлення про рознос живлячих електродів (xxx), номер живильного електрода (xxxx) і номер поточного вимірювання (xxxxx). У випадку виявлення помилки в інтерфейсі зв'язку з комутатором СОМх64 на індикатор виводиться повідомлення про помилку (err). Номер поточного вимірювання є номером координати x планшета, збільшеної на 1. Зміна номера вимірювання здійснюється одночасно зі зміною координати x (за допомогою клавіш "4" і "5"), при цьому можна переглянути раніше записані в пам'яті значення вимірювань. Клавіші "7" і "8" (зміна координати АВ у звичайному режимі роботи вимірювача) служать для перевірки зв'язку з ко-

мутатором. Кількість координат АВ у поточному планшеті може бути більша ніж одна, і оскільки при зміні номера вимірювання значення координати АВ не змінюється, то в поточному планшеті значення вимірювань будуть записуватися для різних координат x (відповідних номеру виміру) і однієї координати АВ. Зміна координати АВ у процесі роботи з комутатором не проводиться, проте при необхідності перемикання координати АВ може бути здійснено в процедурі 1 програмування, що дозволяє зробити запис декількох результатів вимірювань для одного й того ж номера вимірювання. Значення поточних координат x і АВ можна вивести на індикатор із допомогою клавіш "6" і "9" відповідно. Початок вимірювань відбувається після натискання клавіші "цикл" (клавіша "изм" має таке ж призначення, як і при звичайному режимі роботи вимірювача, і не призначена для управління комутатором СОМх64).

Після натискання клавіші "цикл" вимірювач отримує від комутатора значення поточного номера вимірювання й встановлює значення координати x планшета відповідно до отриманого номера вимірювання. Зупинка поточного вимірювання здійснюється шляхом натискання клавіші "ЗАП", після чого вимірювач записує отриманий результат в пам'ять, передає команду комутатору на переключення й збільшує номер поточного вимірювання на 1. У випадку, якщо при цьому не відбувається зміна номера живильного електрода, процес вимірювань триває. Якщо ж при перемиканні на наступний номер вимірювання відбувається зміна номера живлячого електрода, вимірювач зупиняє вимір і виводить на індикатор повідомлення про перенесення живильного електрода (mov). Продовження роботи проводиться при натисканні на клавішу "цикл". Зупинка вимірювання без запису в пам'ять вимірювача результату й без видачі команди комутатора на перемикання здійснюється при повторному натисканні на клавішу "цикл". При закінченні протоколу після чергового натискання клавіші "ЗАП" у режимі проведення вимірювань вимірювач переходить у стан "стоп вимірювань" і виводить при цьому повідомлення на індикатор (stp), при виявленні збою в інтерфейсі зв'язку з комутатором вимірювач переходить у стан "стоп" і виводить на індикатор повідомлення про помилку (err).

5. Підготовка до роботи зарядного пристрою.

5.1. Зарядний пристрій підключається до генератора та вимірювача апаратури ЭРП-1 за допомогою з'єднувачів, розміщених на кабелях зарядного пристрою. Зарядний пристрій до складових частин комплексу підключається з від'єднаною вилкою від мережі 220 В 50 Гц відключеним живленням складових частин комплексу та переведеними тумблерами "Робота/Заряд" приладів у положення "Заряд". Крім того, для генератора ЭРП-1 тумблер "Внутр. пит./Внешн. пит.2 необхідно перевести в положення "Внутр.пит."

Забороняється перемикати тумблер "робота/заряд" приладів у положення "робота" при підключеному кабелі зарядного пристрою.

5.2. Для включення зарядного пристрою й початку заряду акумуляторів необхідно підключити вилку мережного кабелю зарядного пристрою до мережі 220 В 50 Гц, після чого перевести тумблер "Вкл. мережа", розміщений на передній панелі зарядного пристрою, у положення "Вкл". Після включення зарядного пристрою автоматично починається заряд акумуляторів складових частин комплексу, якщо вони були підключені до зарядного пристрою. Для продовження заряду після припинення процесу зарядження служать кнопки "Заряд акумуляторів генератора" і "Заряд акумуляторів вимірювача".

5.3. Контроль заряду акумуляторних блоків складових частин комплексу проводиться за станом світлодіодів "Заряд акумуляторів генератора" і "Заряд акумуляторів вимірювача", розміщених на передній панелі зарядного пристрою.

5.3.1. Стани світлодіода "Заряд акумуляторів генератора": "світиться постійно" – відбувається заряд блока акумуляторів генератора, при цьому акумулятори генератора заряджені менше, ніж на 80% повної ємності; "блимає" – відбувається заряд блока акумуляторів генератора, при цьому акумулятори генератора заряджені більше, ніж на 80% повної ємності; "не світиться" – процес заряду блока акумуляторів генератора завершений.

5.3.2. Стани світлодіода "Заряд акумуляторів вимірювача": "світиться постійно" – відбувається заряд двох блоків акумуляторів вимірювача або комутатора; "блимає" – відбувається заряд

одного блока акумуляторів вимірювача або комутатора, заряд другого завершено; "не світиться" – заряд обох блоків акумуляторів вимірювача й комутатора завершений.

6. Більш детальні відомості щодо роботи з апаратурою ЕРП-1 наведені в інструкції по експлуатації комплексу та в методичних рекомендаціях по виконанню відповідних геоелектричних методів.

Навчальне видання

ВИЖВА Сергій Андрійович
РЕВА Микола Васильович
ОНИЩУК Віктор Іванович
ОНИЩУК Іван Іванович

ЕЛЕКТРОМЕТРІЯ. ПОСІБНИК ІЗ НАВЧАЛЬНОЇ ГЕОФІЗИЧНОЇ ПРАКТИКИ

Редактор *О.Я. Гончар*

Оригінал-макет виготовлено Видавничо-поліграфічним центром "Київський університет"
Виконавець *О. Бондаренко*



Формат 60x84^{1/16}. Ум. друк. арк. 17,67. Наклад 150. Зам. № 213-6793.
Гарнітура Times New Roman. Папір офсетний. Друк офсетний. Вид. № Гл12.
Підписано до друку 25.03.14

Видавець і виготовлювач
Видавничо-поліграфічний центр "Київський університет"
01601, Київ, б-р Т. Шевченка, 14, кімн. 43
☎ (38044) 239 32 22; (38044) 239 31 72; тел./факс (38044) 239 31 28
e-mail: vpc@univ.kiev.ua
[http: vpc.univ.kiev.ua](http://vpc.univ.kiev.ua)

Свідоцтво суб'єкта видавничої справи ДК № 1103 від 31.10.02