

550.8:519.6

М64

М.Л. МИРОНЦОВ

**ЕЛЕКТРОМЕТРІЯ  
НАФТОГАЗОВИХ  
СВЕРДЛОВИН**

550.8:519.6  
МБЧ

**НАЦІОНАЛЬНА  
АКАДЕМІЯ НАУК УКРАЇНИ**

**ІНСТИТУТ ТЕЛЕКОМУНІКАЦІЙ І ГЛОБАЛЬНОГО  
ІНФОРМАЦІЙНОГО ПРОСТОРУ**

---

**NATIONAL ACADEMY  
OF SCIENCES OF UKRAINE**

**INSTITUTE OF TELECOMMUNICATIONS  
AND GLOBAL INFORMATION SPACE**

M.L. MYRONTSOV

---

**ELECTROMETRY IN OIL  
AND GAS WELLS**

550,8:519.6  
МБЧ

М.Л. МИРОНЦОВ

---

**ЕЛЕКТРОМЕТРІЯ  
НАФТОГАЗОВИХ  
СВЕРДЛОВИН**

КНИГОСХОВИЩЕ



УДК 550.832.7:519.6](02)

М64

Рецензенти:

чл.-кор. НАН України, д.ф.-м.н., професор Є.І. Никифорович  
д.ф.-м.н. С.К. Полумієнко

Рекомендовано до друку Вченою Радою  
Інституту телекомунікацій і глобального інформаційного простору  
НАН України  
(протокол №12, 12.12.2018)

*Видання здійснене за підтримки  
Національної академії наук України*

Редактори: В.П. Берчун, к.т.н. В.О. Охарев

М64 Миронцов М.Л. Електрометрія нафтогазових свердловин – К.:  
ТОВ «Видавництво «Юстон», 2019. – 217 с.

ISBN 978-617-7361-72-4.

У монографії розглянуто широке коло питань електрометрії свердловин, які охоплюють історію розвитку електричного та індукційного каротажу, огляд їх фізичних основ та технічних особливостей їх моделювання, теорію та практичні аспекти реалізації числового розв'язання як окремо оберненої задачі електричного чи індукційного каротажу, так і спільного її розв'язання.

Для студентів, аспірантів та наукових співробітників у галузі електрометрії нафтогазових свердловин.

The monograph examines a wide range of issues of electrometry of wells that cover the history of the development of electric and inductive logging, an overview of their physical foundations and technical features of their modeling, the theory and practical aspects of the implementation of the numerical solution as a separate inverse problem of electric or inductive logging, and its common solution.

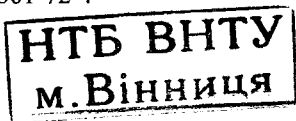
For students, post-graduates and scientific researches at electrometry of oil and gas wells.

483843

УДК 550.832.7:519.6](02)

ISBN 978-617-7361-72-4

© М.Л. Миронцов, 2019



## ПЕРЕДМОВА

---

---

До тих пір, доки єдиним можливим способом видобутку нафти і газу буде буріння та експлуатація свердловин, доти геофізичне дослідження свердловин (ГДС) не втратить своєї актуальності.

Враховуючи те, що відбір керну є набагато складнішим, коштовним та тривалим способом, то актуальність саме електричного та індукційного методів дослідження провідності навколосвердловинного простору важко переоцінити, оскільки саме електрометрія, як складова ГДС, дає відповіді на два головних питання (які цікавлять Замовників ГДС):

- яка кількість вуглеводнів у розрізі?
- де саме вони в ньому розташовані?

На сьогодні існує багато наукових і науково-популярних праць, присвячених різним аспектам електрометрії свердловин, а також достатня кількість монографій і підручників, присвячених суто числовим методам розв'язання задач електрометрії.

Метою цієї роботи є аналіз ефективного вирішення задач електрометрії числовими методами, який включає в себе розгляд всієї ланки задач, починаючи з фізики виміру уявних величин опору чи провідності у свердловині, до вибору моделі, що описує породу, розкриту свердловиною, із максимально точним встановленням її геоелектричних параметрів. Особлива увага буде приділена способам визначення похибки встановлення таких параметрів, тобто точності розв'язання оберненої задачі електрометрії.

У роботі використано багаторічний досвід співпраці автора як з науковими організаціями України і близького зарубіжжя, так і з комерційними сервісними і приладобудівними геофізичними компаніями.

До роботи частково включено результати, що були отримані за підтримки **Державного Фонду Фундаментальних Досліджень України** (Гранти Президента для молодих учених 2011, 2012, 2015 рр.) та під час виконання **науково-технічного проекту НАН України** у 2018 році.

Автор висловлює щирю подяку чл.-кор. НАН України, д.т.н., проф. **О.М. Трофимчуку** за всебічну підтримку, надані цінні поради та людяну увагу, без яких ця робота навряд чи була би завершена в даному виді.

# УМОВНІ ПОЗНАЧЕННЯ

---

## Скорочення

**АК** – акустичний каротаж  
**АМК** – апаратурно-методичний комплекс  
**БК** – боковий каротаж  
**БКЗ** – бокове каротажне зондування  
**ВКІЗ** – високочастотне індукційне каротажне зондування  
**ГДС** – геофізичне дослідження свердловин  
**ГК** – гамма-каротаж  
**ДДЗ** – Дніпровсько-Донецька западина  
**ЕК** – електричний каротаж  
**ЕОМ** – електронно-обчислювальна машина  
**ЕРС** – електрорушійна сила  
**ІК** – індукційний каротаж  
**ІНГК** – імпульсний нейтрон-нейтронний каротаж  
**МБК** – мікробоковий каротаж  
**МК** – мікрокаротаж  
**НГК** – нейтронний гамма-каротаж  
**НДДКР** – науково-дослідна та дослідно-конструкторська роботи  
**ПО** – питомий електричний опір  
**ПП** – питома електрична провідність

**ПС** – каротаж самочинної поляризації  
**СЛАР** – система лінійних алгебраїчних рівнянь  
**СРМ** – система рівнянь Максвелла  
**РФ** – рівняння Фредгольма першого роду типу згортки  
**ЦСК** – циліндрична система координат  
**УО** – уявний електричний опір  
**УП** – уявна електрична провідність  
**ЯК** – ядерний каротаж

## Позначення

$\rho$  – питомий опір  
 $\tilde{\rho}$  – уявний опір  
 $\rho_{\text{П}}$  – питомий опір неушкодженої фільтратом бурового розчину частини пласта  
 $\rho_{\text{С}}$  – питомий опір бурового розчину (питомий опір свердловини)  
 $\rho_{\text{З}}$  – питомий опір зони проникнення фільтрату бурового розчину

$\rho_{ПЗ}$  – питомий опір промітої зони  
 $r_C$  – радіус свердловини  
 $D/d$  – відношення діаметра зони проникнення до номінального діаметра свердловини  
 $\sigma$  – питома провідність  
 $\sigma$  – уявна провідність  
 $\sigma_{П}$  – питома провідність неушкодженої фільтратом бурового розчину частини пласта  
 $\sigma_C$  – питома провідність бурового розчину  
 $\sigma_3$  – питома провідність зони проникнення фільтрату бурового розчину  
 $\sigma_{ПЗ}$  – питома провідність промітої зони  
 $\omega$  – частота  
 $\mu$  – магнітна проникливість  
 $\varepsilon$  – діелектрична постійна

$(r, z, \varphi)$  – координати у ЦСК  
 $r_3$  – радіус зони проникнення фільтрату бурового розчину  
 $r_C$  – радіус свердловини

#### Позначення на планшетах

PS, ПС – каротаж ПС  
 ОНММ – Ом·м  
 ННМО – мСм/м  
 $R_{\text{ПЛАСТА}}, R_{П}$  – ПО неушкодженої фільтратом бурового розчину частини пласта  
 $R_{\text{ЗОНИ}}, R_3$  – ПО зони проникнення фільтрату бурового розчину  
 CALI, dc – реальний діаметр свердловини  
 GR – гама-каротаж  
 Dn, dсном – номінальний діаметр свердловини  
 RB – резистивіметрія

---

---

# РОЗДІЛ І. ПРЯМІ ЗАДАЧІ

---

---

## Вступ до розділу І

Розділ починається з історичного нарису розвитку електрометрії від перших експериментів і перших приладів до перших спроб зіставлення вимірних уявних величин з характеристиками провідності породи, що розкрита свердловиною.

Показано еволюцію наукової думки від першого каротажу до використання обчислювальних методів як для вирішення прямих задач, так і перших спроб вирішення обернених задач. Дано опис процесу розв'язання оберненої задачі у поетапному вигляді. Наведено приклади палеточного способу інтерпретації електрометрії, що використовувався на виробництві в Україні та країнах близького зарубіжжя ще на початку цього тисячоліття. Окреслено, які основні недоліки мав такий спосіб інтерпретації, а отже, які саме нові задачі електрометрії залишались нерозв'язаними та визначили розвиток електрометричної думки, починаючи з 2000-х років.

У другій главі описано фізичні основи методу уявного опору та принципи каротажу як нефокусованими градієнт-зондами та потенціал-зондами, так і фокусованими: трьохелектродним зондом бокового каротажу, апаратурою двозондового та багатозондового бокового каротажу. Показано, яким чином значення опору бурового розчину обмежує діапазон виміру уявного опору породи, розкритої свердловиною. Дано порівняльні характеристики фокусованим та нефокусованим методам. Для оцінки вертикальної роздільної здатності широко використовуваної в Україні та на теренах країн близького зарубіжжя апаратури БКЗ та зонда БК-3 наведено приклади їх каротажних діаграм для найпростіших ілюстративних моделей розрізів.

У третій главі розглянуто фізичні основи індукційного каротажу, як у лінійному наближенні, так і з урахуванням взаємодії струмів у середовищі. За допомогою поняття вертикального та радіального геометричних факторів

надано порівняльну характеристику різних трьохкатушкових зондів та зондів 6Ф1 та 7Ф1.6. За допомогою аналітичного розв'язку прямої задачі індукційного каротажу у нескінченному однорідному середовищі досліджено робочі діапазони цих зондів. Описано фізичну різницю в способі визначення провідності навколосвердловинного простору електричними та індукційними методами та, як наслідок, принципову різницю в їх геофізичних характеристиках. Розглянуто парадокс анізотропії і його вплив на різні методи електрометрії. Для оцінки вертикальної роздільної здатності апаратури 4ІК та зонда 6Ф1 наведено приклади їх каротажних діаграм для найпростіших ілюстративних моделей розрізів. Описано можливість залучення допоміжних методів для визначення інтервалів з проникненням, таких як мікрометоди та метод самочинної поляризації.

У четвертій главі на прикладі електричного каротажу розглянуто питання обґрунтування вибору та застосування того чи іншого числового методу розв'язання прямої задачі електрометрії. Обґрунтовано ефективність використання кусково-постійного завдання значень ПО навколосвердловинного простору та пояснено подальше використання тришарової моделі пластів. Описано клас моделей, для яких доцільно розв'язувати прямі задачі з подальшим тестуванням для них алгоритмів розв'язання обернених задач. Розглянуто питання необхідності тестування будь-якої програмної реалізації розв'язання прямої задачі електрометрії, наведено приклади такого тестування для програм розв'язання прямих задач, які використовувались при підготовці матеріалів для цієї монографії.

## ІСТОРИЧНА РЕТРОСПЕКТИВА РОЗВИТКУ ЕЛЕКТРОМЕТРІЇ

### 1.1. Від перших експериментів до кількісної інтерпретації

Історичний розвиток створення апаратури та методики електрометрії бере свій відлік з початку ХХ сторіччя і умовно поділяється на кілька етапів, чергування яких було обумовлено як прогресом в електроніці та обчислювальній техніці, так і новими потребами ГДС, в тому числі економічними.

На цей момент існує значний обсяг узагальнюючих робіт, які тою чи іншою мірою зачіпають історію або хронологію розвитку як апаратурних, так і методичних аспектів ЕК і ІК (наприклад (Anderson, 2001; Красножон, 2002; Зайченко, 2006; Миронцов, 2012d)). Зупинимось коротко на основних аспектах розвитку каротажу, які, на думку автора, і визначили сучасний стан електрометрії свердловин.

Всупереч доволі поширеній думці, задля справедливості слід зауважити, що температура – це перший фізичний параметр, який був вимірний у свердловині. Разом із тим багато хто вважає саме ЕК першим фізичним методом дослідження, використаним у свердловині. Незважаючи на те, якому з методів належить «пальма першості», для наступного важливо, що від першого промислового застосування і до сьогодні електрометрія зберігає статус основного методу для визначення вмісту вуглеводнів (в основному в гірських (осадових) породах у теригенних розрізах і в необсаджених колоною свердловинах (Ханин, 1969; Пирсон 1996)).

Електричний каротаж в обсаджених свердловинах (Кашик та ін., 2003; Рыхлинский та ін., 2009), або як його ще називають «ЕК через колону», ми не розглядатимемо, хоча його застосування останніми роками стає дедалі поширенішим.

Першими впровадили каротаж в практику розвідки (і власне вжили цей термін) брати Конрад і Марсель Шлюмберже (Schlumberger). Перший електричний експеримент братів Шлюмберже був поставлений в 1912 році і представляв собою два встромлених електроди в поверхню землі з подальшим визначенням еквіпотенційних ліній на її поверхні. У 1920 році брати відкрили першу комерційну каротажну компанію та 5 вересня 1927 року провели спільно з Генрі Додем свій перший каротаж (тепер вже класичним градієнт-зондом). Нафтова галузь швидко оцінила новачку братів Шлюмберже для пошуку вуглеводнів.

У 1929 р. почалося комерційне застосування ЕК братів Шлюмберже в США, Венесуелі, Росії (Schlumberger, Schlumberger, 1929). У 1931 р. (в чомусь, випадково) було відкрито другий метод ГДС – каротаж ПС (PS ..., 1934). Одночасне застосування каротажу опорів і ПС також стало свого роду революцією, оскільки дозволило за даними ПС виділяти пористі породиколектори (власне ПС в той час так і називався – «каротаж пористості» (Heiland, 1940)), а по УО розділяти їх на водоносні і продуктивні.

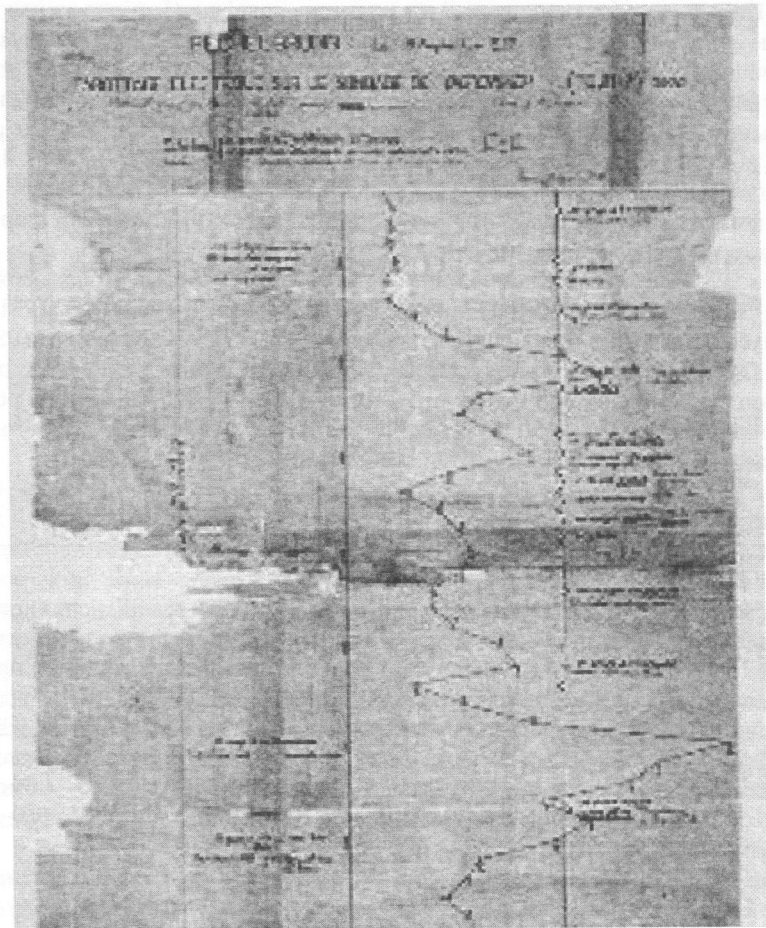
У 1930-х роках компанія Schlumberger почала застосовувати свій перший каверномір (з чотирма лапами), а вже у 1940-х роках на кожній лапі з'явився мікрозонд ЕК, і це дозволило оцінювати кут залягання і просторову орієнтацію пластів.

Через 20 років після першого ЕК (рис. 1.1) компанія Schlumberger створила комплекс, що складається з ПС, двох потенціал-зондів (normal sonde) і одного градієнт-зонда (lateral sonde). Відтоді практично щороку з'являлись нові комбінації комплексу електрометрії ГДС.

Уже в 1933 р. була опублікована монографія академіка СРСР В.О. Фока (Фок, 1933), присвячена, в тому числі, вирішенню прямої задачі ЕК для випадку пласта необмеженої потужності. З цього моменту починається новий етап в історії промислової геофізики, який можна назвати етапом напіваналітичних рішень.

Що собою являють такі рішення? Це, по суті, аналітичні вирази, що дозволяють зв'язати вимірний УО з геоелектричними параметрами моделі розрізу для деякої ідеалізованої моделі. Наприклад, в роботі (Альпін, 1938) градієнт-зонди і потенціал-зонди описуються тільки одним параметром – довжиною  $L$ , в той час як насправді повинні описуватися лінійними відстанями  $AM$ ,  $MN$ ,  $NB$  (а при більш точному розрахунку – ще й лінійними розмірами електродів і діаметром приладу). У дійсності така ідеалізація може призводити до суттєвого спотворення результатів (Миронцов, 2003). Однак на той час, за відсутності можливості вирішити пряму задачу більш точно, ці напіваналітичні результати були революційними і дозволили перейти від етапу вимірювання УО до етапу визначення (поки що наближеного) геоелектричних параметрів розрізу.





**Рис. 1.1.** Діаграма першого у світі каротажу (методом опорів)

Більш того, такий підхід мав продовження. Результати, отримані В.А. Фоком, узагальнив А.І. Забаровський для тришарової моделі середовища (свердловина – зона проникнення фільтрату бурового розчину – неушкоджена фільтратом бурового розчину частина пласта) (Заборовский, 1943).

Були також опубліковані роботи В.Р. Бурсіана, Л.М. Альпіна і С.М. Шейнмана, в яких розглядалися аналітичні розв'язки задач ПС (Бурсиан, 1936; Альпин, Шейнман, 1936). Застосування методу зображень

дозволило В.Р. Бурсіану отримати прості розв'язки для плоскопаралельних однорідних пластів без впливу свердловини, а також для одного пласта кінцевої потужності і наближений розв'язок з урахуванням свердловини в разі, якщо ПО вміщуючих порід дорівнює ПО свердловини. Ці розрахунки було покладено в основу методики інтерпретації каротажного зондування С.Г. Комарова (Комаров, 1950). Запропонований Л.М. Альпінім (Альпин, 1962b) метод сіткового моделювання і розроблений на його основі А.Є. Кулінковичем (Кулинкович, 1959) електроінтегратор дозволили експериментально отримати ряд палеток, які також були використані в новій методиці інтерпретації (Комаров, 1962).

Зокрема, Л.М. Альпін розглянув прямокутну сітку з неоднорідним кроком, яка відповідає 2D задачі ЕК. А.Є. Кулінкович застосував отримані Л.М. Альпінім значення опорів сітки до значень опорів комірок електроінтегратора і детально розглянув питання завдання значень опорів електроінтегратора, спосіб реалізації стабілізатора і вимірювача струму.

Слід також зазначити, що в напрямку лабораторного моделювання (з невеликою затримкою) тривали роботи не лише в СРСР. Так, в 1950 році (Guyod, 1955) компанія Schlumberger створила свій електроінтегратор, що дозволяє більш реалістично проводити 2D моделювання для моделі свердловина + тонкі пласти із зоною проникнення.

Наприкінці 1970-х років обчислювальна техніка розвинулася настільки, що розрахунок прямої задачі за допомогою методу скінченних різниць або кінцевих елементів займав не тижні, а години. На початку 1980-х років практичне використання електроінтеграторів припинилося (проте частка експериментального моделювання все одно зберігається, оскільки багато досліджень (наприклад, оцінка впливу контактного потенціалу на УО зондів БК) шляхом моделювання з необхідною точністю провести не вдається).

Відтоді розв'язання прямої 2D задачі методом скінченних різниць втратило наукову новизну і вважається тривіальним (Chang, Anderson, 1984). Воно стало масово застосовуватися при моделюванні приладів (виконання НДДКР) і для розрахунку палеток.

Проте зарано стверджувати, що в питанні ефективного числового розв'язання прямої задачі була поставлена остаточна крапка. Дотепер тривають результативні роботи з підвищення швидкості і точності числового розрахунку (Балдин, Шурина та ін., 2000; Tonti, 2001). Також порівняно недавно з'явився новий підхід до збільшення швидкості числового розрахунку, в тому числі з використанням графічних процесорів (Глинских та ін., 2011; Ельцов, 2011).

Повертаючись до хронології, зауважимо, що паралельно із створенням різних електроінтеграторів і особливо після цього пошук напіваналітичних

розв'язків тривав. Так, в роботі А.Є. Кулінковича (Кулинкович, 1962b) розглядається поле точкового джерела при коаксіально-циліндричних границях розділу середовищ різного  $\rho$  в разі зміщення джерела з осі свердловини. Вирази потенціалу в точках положення вимірювальних електродів отримані в квадратурах.

У роботі Л.М. Альпіна (Альпин, 1962a) запропоновано метод дивергентного каротажу, заснований на можливості визначення величини струму, що «стікає по свердловині», і тим самим на можливості обчислення величини струму, що «стікає точно в пласт», який розраховується через другу різницю потенціалів. Метод, по суті, став першим кроком до розв'язання оберненої задачі визначення  $\rho$  пласта за даними каротажного зондування і знайшов широке практичне застосування.

Також Л.М. Альпін розробив обчислювальний алгоритм для арифмометра, за допомогою якого розраховувалась залежність  $UO$  від  $\rho$  зони проникнення та її діаметра (Альпин, 1938). Було введено поняття «коефіцієнта зонда» – множника, при множенні на який вимірюваний, для випадку нескінченного однорідного середовища,  $UO$  дорівнює  $\rho$  цього середовища. Розраховані Л.М. Альпіним криві отримали назву – «палетки». Використовуючи такі палетки, С.Г. Комаров запропонував концепцію використання БКЗ, яка дозволяла визначати на практиці параметри тришарової моделі (Комаров, 1938; 1950).

На Заході була вирішена задача для точкового електрода, що знаходиться в горизонтально-шаруватому середовищі (Anderson, 2001). Це дозволило розрахувати криві для одиночних пластів, які видавалися в 1930-х роках у вигляді альбомів для інтерпретації. Така інтерпретація зводилася до «знаходження в альбомі візуально найбільш схожої кривої». Цей підхід зберігався до 1970-х років.

У 1953 році був виданий практично вичерпний (для того часу) альбом розрахованих палеток (Альпин, Комаров, 1953), який багато десятиліть був основою кількісної інтерпретації БКЗ. Водночас продовженням робіт з експериментального пошуку різноманітних прямих задач ЕК стали дослідження П.М. Белоша і Е.А. Неймана з моделювання каротажу на інтеграторі з дротяною сіткою, результати цього моделювання також частково увійшли в різні методики інтерпретації.

Завдяки цим роботам Л.М. Альпін і А.Є. Кулінкович обґрунтовано перейшли до інтерпретації кривих  $UO$  у пластах обмеженої потужності з урахуванням свердловини (Альбом ..., 1964; Дахнов, 1967). В.М. Дахнов (Дахнов, 1967; 1972) послідовно дослідив питання геологічної інтерпретації за  $\rho$ .

У світлі дослідження хронології розробки ЕК і ІК слід зазначити, що роботи Л.М. Альпіна і С.Г. Комарова, по суті, стали першим прикладом розробки апаратурно-методичного комплексу, яка включала в себе:

- 1) розробку теорії методу;
- 2) вибір параметрів зондуючого пристрою (в даному випадку вибір довжин зондів);
- 3) оцінку необхідного метрологічного забезпечення (оцінка точності вимірювання, необхідна для достовірного визначення параметрів розрізу);
- 4) розробку бази інтерпретації (в даному випадку – альбом палеток);
- 5) розробку методики такої інтерпретації;
- 6) петрофізичне забезпечення, що дозволяє перейти від величини УО до таких понять, як пористість, нафто- і газонасиченість;
- 7) випробування комплексу на фактичному матеріалі, яке допомогло визначити певні рамки ефективного застосування даного комплексу, його переваги і недоліки (цей етап тривав не одне десятиліття).

Необхідно також додати декілька слів про петрофізичне забезпечення. По суті, розробка комплексу БКЗ показала, що тільки результат розв'язання оберненої задачі (встановлення просторового розподілу ПО в розрізі) з геологічної точки зору представляє цінність, оскільки саме він дозволяє досягти кінцевої мети ГДС – визначення характеристик пластів-колекторів, таких як пористість, нафто- і газонасиченість тощо.

Саме така постановка питання (зв'язок між просторовим розподілом ПО і петрофізичними параметрами) і започаткувала цілий напрямок, який отримав назву «петрофізика». Основи цього напрямку були закладені, в основному, І.М. Коганом (Коган, 1936), В.М. Дахновим (Дахнов, 1941; 1955), Г.Є. Арчі (Archie, 1942; 1995), С.Г. Комаровим (Комаров, 1956). Сам термін «петрофізика» запропонував Г. Арчі, зокрема, в лабораторних експериментах початку 1940-х років було показано, що відношення ПО породи і рівноважного з нею розчину є постійною величиною (закон Арчі).

Роботи в цій галузі були спрямовані на те, щоб визначити, які саме властивості гірських порід є найбільш інформативними з точки зору «розрахункових параметрів»: пористості, флюїдонасиченості, проникнення і т. п. Так, А.І. Кринарі (Кринари, 1954), Н.А. Перніков (Перников, 1957), Г.С. Морозов (Морозов, 1958) розробили емпіричні методики визначення пористості за ПС; А.М. Нечай (Нечай, 1952; 1954) – визначення нафтонасичення по каротажу опорів. Основним об'єктом перших петрофізичних досліджень стали теригенні розрізи (Эйдман, 1956; Кейвсар, 1958; Вендельштейн, 1960), що можна пояснити їх відносно простою будовою. Але вивчалися також і складніші за будовою розрізи, в тому числі карбонатні (Pontecorvo, 1941; Басин та ін., 1964).

Проте для нас головне, що вхідними даними петрофізичних задач, які характеризують провідність розкритого свердловиною пласта, є не «усереднені» величини УО, а чітко визначені геоелектричні параметри розрізу, тобто геометричні параметри та значення ПО (його просторовий розподіл).

Після Другої світової війни розвиток ГДС продовжився ще вищими темпами, що було обумовлено неймовірно зростаючою роллю нафти в економіці і безпеці будь-якої розвиненої держави.

У 1950-х роках з'явилися фокусовані методи ЕК і ІК. Перший трьохелектродний фокусований зонд LL3 запропонував Конрад Шлюмберже ще в 1920-х роках, але комерційна його версія вийшла тільки в 1955-му після суттєвого доопрацювання Г. Доля (Doll, 1955a).

До подальшого розвитку фокусованих систем можна віднести також запропоновану Г. Долям систему LL7 (Doll, 1951; 1955b) або її модифікацію LL8 (з підвищеною глибинністю) (Doll, 1955c).

Після появи фокусованих методів на практиці стала широко застосовуватися зв'язка подвійного БК з мікросферичним зондом (Henry, Seeman, 1970; Suau та ін., 1972; Sholberg, 1973).

Загалом у період з 1950-х до початку 1980-х років стандартний набір методів компанії Schlumberger налічував: фокусований ЕК або ІК, ПС, АК, НК або ГК.

На початку цього періоду були остаточно виявлені недоліки використання для інтерпретації аналітичних і напіваналітичних методів розв'язання прямої задачі, що зумовило створення високоефективних аналогових пристроїв моделювання ЕК (Альпин, 1953). За розрахунками Л.М. Альпіна вже в 1959 році було випущено два нових промислових електроінтегратори (Куликович, 1962a).

Для моделювання ІК був створений кільцевий інтегратор (Кауфман, Шапіро, 1959). У США також були розроблені електроінтегратори (Guyod, 1955). Їх було прийнято вважати «більш простими, але менш точними».

Використання інтеграторів у 1950-х роках дозволило, зокрема, підійти до вирішення оберненої задачі БКЗ для тонкошаруватих розрізів (Дахнов, Нейман, 1953; Альпин, 1958; Куликович, 1958). Незалежно Н.Н. Сохрановим була вирішена задача для випадку перехідної зони поблизу водонафтового контакту (Сохранов, 1960). А. Ворсінгтон і Р. Мелдо отримали комплекти палеток для каротажу ПС (Ворсінгтон, Мелдо, 1959).

Можна відзначити також, що лабораторне моделювання не обмежувалося застосуванням інтеграторів: для задач мікрокаротажу використовувалася електролітична ванна (Побочина, 1959; Савостьянов, Чукин, 1966).

Але наступний розвиток електрометрії виявив обмеженість подальшого розвитку електроінтеграторів. Зокрема, створення нових типів апаратури ЕК і ІК вимагало створення нових інтеграторів або істотної модифікації старих, що було пов'язано із значними часовими і фінансовими витратами. Крім того, обсяг розрахованих палеток став значним, що робило їх використання на практиці малоефективним, тому що вимагало трудомісткого і тривалого процесу.

Так виникла задача пошуку істотно нових шляхів розв'язання прямих та обернених задач електрометрії.

Тим більше, що і для отриманих аналітично розв'язків прямих задач для досить складних моделей були встановлені обмеження. Наприклад, за допомогою еліпсоїдального способу (поверхня зонда замінюється еліпсоїдом обертання з більшою віссю, що дорівнює довжині зонда, а меншою – діаметру) для бокового (трехелектродного) каротажу були отримані розв'язки для випадку свердловина + зона проникнення + не ушкоджена буровим розчином частина пласта) (Ильинский, 1971), однак згодом було доведено, що ці формули є невірними, якщо ПО пласта більший за ПО свердловини у 1000 разів (Чукин та ін., 1976).

І хоча робота з електроінтеграторами тривала (в СРСР до 1990-х років (Журавлев, Попов, 1962; Попов та ін., 1964), в Schlumberger – до 1960-х років (Anderson, 2001)), а подекуди з'являлись нові аналітичні розв'язки для різних моделей розрізів і різних типів апаратури, саме в той період почалась ера комп'ютерного моделювання в ГДС.

У СРСР на першому етапі це були, в основному, роботи А.С. Кулінковича, Н.Н. Сохранова, С.М. Зундулевич, І.М. Чуринової (Ильина та ін., 1963; Сохранов, 2000).

Загалом, до моменту виникнення перших доступних і досить продуктивних ЕОМ були вирішені наступні завдання:

- пряма задача в ряді найпростіших випадків вирішена аналітично;
- пряма задача для актуальних моделей, в яких неможливо знайти рішення аналітично, була вирішена за допомогою електроінтегратора;
- за даними перших двох етапів створені альбоми палеток для існуючих модифікацій апаратури (БК-3, БК-7, БКЗ, LL3, LL7, 6FF40 і т.п.), що дозволяють вручну інтерпретувати дані каротажу (знаходити розв'язання оберненої задачі).

Подальший прогрес у розвитку ЕК і ІК в 1980-1990-х роках можна пояснити двома факторами (Сохранов, 2000): переходом на цифрову реєстрацію і алгоритмізацією процесу обробки та інтерпретації. Так, поява можливості обробляти і передавати цифрові сигнали зумовила бурхливий розвиток методів ЕК і ІК і появу перших багатозондових фокусованих приладів, сканерів і т.п. Водночас виникнення доступних для використання



А83843

обчислювальних ресурсів і алгоритмів і потреба в створенні нових, а також можливість створення нових типів апаратури ЕК і ІК зумовили подальший розвиток наукових пошуків в області теорії прямих і обернених задач ЕК і ІК.

Проблематика подальших робіт в цьому напрямку була тісно пов'язана з числовими методами розв'язання рівнянь електричного та електромагнітного полів.

Важливим етапом стала можливість використовувати ЕОМ для вирішення одних з найбільш загальних і широко відомих тепер у електрометрії задач (для яких у загальному випадку не існує аналітичного розв'язку), а саме для середовищ, ПО яких можна описати кусково-постійними функціями з ортогональними границями.

Із широкого кола числових методів слід особливо виділити загальні методи розв'язання диференціальних рівнянь (Самарский, 1971; Самарский, Гулин, 1989) зі змінними коефіцієнтами, які отримали широке розповсюдження – метод скінченних різниць та скінченних елементів (Магоматов, Хлодов, 1988; Тихонов та ін., 1990).

Окремо слід виділити підходи, що дозволяють суттєво спростити моделювання при використанні фізично обґрунтованих припущень (Сеймов та ін., 1990; Трофимчук та ін., 2003; Довгий та ін., 2010; Довгий та ін., 2011; Довгий та ін., 2014; Гомилко та ін., 2016).

Крім того, необхідно одразу зауважити, що використання можливих спрощень, викликаних можливістю застосовувати числові методи тільки для обмеженого класу моделей, дозволяє їх істотно оптимізувати для застосування до конкретних задач геофізики, про що далі (див. глави 3, 4).

Взагалі прикладом ефективності застосування будь-яких числових методів (і деяких спрощень моделі при їх застосуванні) може слугувати історія розвитку моделювання в 1980-х роках: після перших успішних числових оцінок (характеристик, експериментів), які підтвердилися безпосередньо на практиці (Anderson, Chang, 1982; Anderson, 1986; Fylling, Spurlin, 1988; Anderson та ін., 1989), стався справжній бум практичного використання моделювання, до якого геофізики перед цим ставилися, не без підстав, з упередженням.

Тут слід окремо відзначити роботи видатного українського вченого в галузі моделювання електрометрії А.Л. Колосова (Колосов, 1977; 1985), в яких послідовно розглянуті питання класифікації задач ЕК, теорема єдності розв'язку прямої задачі ЕК, побудови кінцево-різницевої схем, застосування розв'язання прямої задачі на кожному кроці ітераційного розв'язання оберненої задачі, метод регуляризації розв'язання оберненої задачі.

Також А.Л. Колосовим розглянуто конкретні зонди і можливість оптимізації схеми в разі наявності в зонді БК автокомпенсатора. Вказано на недолік використання автокомпенсатора, оскільки в цьому випадку виникає

необхідність змінювати кількість і тип рівнянь при заміні моделі (кількість елементів) і повторювати розрахунок матриці коефіцієнтів Максвелла, що не завжди може бути тривіальним.

## 1.2. Розв'язання оберненої задачі на початку ери ЕОМ

Ідею будь-якої геологічної інтерпретації (за запропонованим поділом Н.Н. Сохранова і С.М. Аксельрода) можна описати так (Сохранов, Аксельрод, 1984): параметри середовища підбираються таким чином, щоб значення зондів в ньому були найбільш близькі до реально отриманих.

Далі всі застосовувані методи відрізняються за різними підходами в питаннях способу:

- визначення значень виміру зонда для обраних параметрів середовища (спосіб розв'язання прямої задачі);

- оцінки «близькості» розрахованих значень вимірів зондів і реально отриманих (вид функціонала, що мінімізується при вирішенні оберненої задачі);

- наближення параметрів моделі при підборі (спосіб ітераційного процесу розв'язання оберненої задачі).

Якщо до систематичного застосування ЕОМ наукова думка йшла по шляху вивчення окремих випадків, що дають змогу вирішити обернену задачу, то розвиток ЕОМ дозволив реалізувати швидкі методи інтерпретації: удосконалювати перший і третій підходи.

Користуючись принципом «все дійсне є розумним», для оцінки ефективності тих чи інших алгоритмів розв'язання оберненої задачі, на думку автора, в першу чергу необхідно дослідити, які з уже розроблених методів були успішно реалізовані і свого часу застосовувались чи продовжують застосовуватись.

Тим більше, що кожний новий реалізований і такий, що свого часу пройшов успішне випробування, алгоритм значною мірою формував і направляв наукову думку подальших поколінь дослідників.

Тут зручно розглядати роботи дослідників з теренів колишнього СРСР, оскільки результати таких робіт і методи, якими вони були отримані, ретельно публікувались у відкритій науковій пресі. Навпаки, методи, що використовувались у капіталістичних країнах, можна назвати в чомусь "секретними". Це пояснюється різною системою організації ГДС: в СРСР наука концентрувалась у наукових інститутах, а в капіталістичних країнах



вся промислова геофізика була зосереджена у комерційних фірмах і тому "наука" була своєрідним «know-how» кожної окремо взятої компанії.

Роботи зі створення алгоритмів інтерпретації ЕК і ІК використовували умовний розподіл процесу на окремі етапи:

- 1) розчленування розрізу на пласти;
- 2) визначення характерних «відліків» в кожному пласті по кожному методу каротажу;
- 3) кількісна інтерпретація за визначеними відліками;
- 4) якісна інтерпретація даних каротажу – визначення літології пластів, ознаки колектора і характеру його насичення.

Першою успішною вітчизняною програмою інтерпретації, мабуть, можна вважати програму інтерпретації БКЗ з подальшими вдосконаленнями (Кулінкович та ін., 1964; Зунделевич та ін., 1965; Зунделевич, 1966; Зунделевич, Сохранов, 1966; Комаров та ін., 1967). Застосований в ній підхід, заснований на згаданому поділі, вперше використовував не тільки значення вимірювання навпроти кожного пласта, але і величину похибки такого виміру, що, як буде показано, має істотне значення при розв'язанні оберненої задачі.

Водночас формується комплексний підхід в ГДС. Непереборні на той момент недоліки кожного з методів намагалися усунути, застосовуючи одночасно кілька методів, що виявилось ефективним, і такий підхід широко використовується дотепер.

До перших таких розробок можна віднести роботи Т.Д. Ільїної (Ільїна, 1963), С.М. Аксельрода і Л.А. Путкарадзе (Аксельрод, Путкарадзе, 1979), Г.Н. Зверева, Л.Д. Труфанової, В.А. Батаніна, Н.З. Заляева, В.Г. Беленького (Беленький та ін., 1970; Зверев та ін., 1970; Зверев, Шакиров, 1972; Зверев, Труфанова, 1974).

Згадані проблеми розглядалися також у роботах А.Є. Кулінковича, М.А. Данілова, Н.А. Травнікова, А.І. Соломасова, Ш.А. Губермана, М.М. Бонгард (Губерман, 1964; Губерман та ін., 1964; Данилов та ін., 1968; Данилов, 1970; Соломасов, 1971).

Загальною тенденцією в роботі зі створення перших методик інтерпретації до появи обчислювальних машин була неможливість в ряді випадків довести результат розв'язання оберненої задачі до однозначного числа (через необхідність частково «ручної» інтерпретації, проблеми еквівалентності і т.п.). Поява необхідних обчислювальних потужностей стала відчутним стимулом розвитку методів числового моделювання та кількісної інтерпретації даних електрометрії. Першими успішними прикладами промислового використання моделювання слід, мабуть, вважати роботи В. Тумана і Д. Болма (Tuman, Bollman, 1961a; 1961b). Однак, як це впливає з

тексту, результати все ж були не зовсім задовільними і широкого застосування методика не отримала.

Так само, як і перші спроби числового моделювання за допомогою методу скінченних елементів задач ЕК і ІК були здебільшого ілюстративними, оскільки доступні обчислювальні ресурси того часу не дозволяли вирішувати такі завдання з необхідною точністю.

Загалом всі перші комплекси інтерпретації мали ряд недоліків – розбивку на пласти і визначення характерних значень кривих вздовж цих пластів інтерпретатору необхідно було робити вручну.

Тільки згодом були створені алгоритми: виділення границі пластів (Сохранов, Кулешова, 1968); оцінки якості запису БКЗ (Зунделевич та ін., 1970); визначення відліків характерних значень БКЗ (Бондаренко та ін., 1996).

У програмі «Каротаж» (Комаров та ін., 1967; Зунделевич та ін., 1972; Зунделевич та ін., 1971; Сохранов, 1969а; 1969б; 1972) була здійснена спроба об'єднати в собі всі напрацювання в галузі автоматичної інтерпретації, які мали найбільший теоретичний інтерес.

Не можна не відмітити порівняно значимий промисловий успіх у створенні інтерпретаційних комплексів на Заході. Це насамперед SARABAND і CORIBAND фірми Schlumberger (Hargrave, 1962; Horn, Slack, 1962) (інтерпретація комплексу методів: ІК, БК, МК, МБК, ПБК, АК, ПС, ГК), а також PROLOG і EPILOG фірми Dresser Atlas (Frost, Fertl, 1980; 1981).

При аналізі цих програм чітко вимальовується підхід до інтерпретації того часу, заснованої на аналізі крос-плотів, статистичній обробці даних, вирішенні систем петрофізичних рівнянь, контролі та коригуванні проміжних результатів, представленні графічного і звичайного табличного результату інтерпретації.

Другим кроком в ітераційному процесі створення інтерпретаційних комплексів даних ГДС і електрометрії зокрема на теренах СРСР можна вважати початок роботи, у структурі Міністерства геології і Міністерства нафтової промисловості, з вироблення вимог і єдиного технічного завдання до автоматизованої системи інтерпретації результатів ГДС «АСОИГИС ЕС». Система була орієнтована на використання третього покоління ЕОМ. Зокрема, система містила (Аксельрод та ін., 1981; Сохранов, Аксельрод, 1984):

- редагування каротажних даних;
- розчленування розрізу по кривих градієнт-зондів (БКЗ);
- визначення попластових УО зондів БКЗ;
- уточнення ПО бурового розчину за алгоритмом Загальносоюзного наукового інституту геофізики;

- побудову зведеного геофізичного розрізу за алгоритмом Центральної геофізичної експедиції;
- виділення колекторів і проникних порід за алгоритмом Угорського геофізичного тресту;
- оцінку коефіцієнта флюїдонасичення.

Досвід практичного застосування цієї системи викладено в роботах В.М. Риндіна, А.Г. Манюкової, Л.С. Кнеллера, Я.С. Гайфуліна, Я.Г. Бурштиновича, І.В. Ряскіної, А.В. Слукіна, С.Н. Фінкельштейна, А.Е. Золотової, С.П. Яніна (Золотова, Янин, 1986; Рындин та ін., 1986; Бурштинович та ін., 1986), але тепер він має суто історичний інтерес.

У середині 1980-х років відбулися дві події, які, можна вважати, стали поштовхом для подальшого розвитку моделювання і, головне, розробки якісно інших алгоритмів розв'язання обернених задач.

По-перше, необхідність підвищення видобутку вуглеводнів вимагала досліджувати тонкі пласти, для яких існуючі методи вже не підходили. По-друге, дедалі більше впроваджувалось горизонтальне буріння, що потребувало вирішувати принципово 3D задачі.

Не останнім для подальшого розвитку електрометрії стало те, що розвиток обчислювальних потужностей в той час досяг вже рівня, коли розв'язання прямої задачі обчислювалось хвилинами, замість годин.

Не дивно, враховуючи технічну відсталість СРСР, що перші значимі результати в галузі використання ЕОМ в повній мірі були отримані на Заході.

Так, у роботах (Anderson, 1986; Anderson, Barber, 1987; 1988) було показано, як пряме моделювання може підвищити точність інтерпретації.

Саме на підставі цих робіт був створений універсальний пакет електромагнітного моделювання ELMOD (Anderson та ін., 1989), комерційна версія якого була широкодоступною.

Тоді ж були проведені роботи із застосування алгоритму «порівняння» (Anderson та ін., 1986; Hardman, Shen, 1986), тобто ітераційного алгоритму розв'язання оберненої задачі, на кожному кроці ітерації якого результат вимірювання порівнювався з результатом моделювання.

Тоді ж в 1980-х роках різні, але конкретні модифікації такого підходу до інверсії були запропоновані для ЕК і ІК (Lin та ін., 1984; Freedman, Minerbo, 1991; Nabashy та ін., 1986; Whitman та ін., 1990).

Однак широкого практичного застосування вони також ще не отримали. Обчислювальні ресурси були недостатніми для розробки і дослідження характеристик відповідних алгоритмів, але ще не достатніми для впровадження на виробництві у щоденний процес. Крім того, на заводі до практичного впровадження постала проблема еквівалентних розв'язків (в тому числі, як наслідок некоректності постановки оберненої задачі).

Вітчизняні дослідники, хоча і не мали доступу до таких обчислювальних ресурсів, як їх закордонні колеги, але зробили значний внесок у теоретичну розробку алгоритмів розв'язання оберненої задачі методом порівняння і аналізу супутних питань.

Тут особливо слід відзначити роботи С.М. Аксельрода, В.Г. Беленького, Г.Е. Гаузера (Аксельрод та ін., 1978; Аксельрод, 1981); О.А. Кауфмана, О.М. Каганського, В.С. Кривопуського (Кауфман, Каганский, 1972; Кауфман та ін., 1974); Ю.О. Дашевського, О.М. Каганського, Л.А. Табаровського, М.І. Епова (Табаровский, Дашевский, 1976; Табаровский, Эпов, 1979; Табаровский та ін., 1976; 1977); М.І. Плюсина, К.Г. Ваксмана, Н.М. Афоніної (Вакман та ін., 1988), Г.Н. Зверева, В.В. Гамбургера, К.Л. Санто (Зверев, 1971; Зверев, Гамбургер, 1971; Зверев, Чаадаєв, 1971; 1972; Зверев та ін., 1973), В.І. Дмитрієва, Е.В. Захарова, І.В. Льїна (Дмитриев та ін., 1972; Захаров, 1979), Б.В. Рудяка (Рудяк, 1988), Е.В. Чаадаєва (Чаадаев, 1991).

Практично у всіх згаданих підходах є багато спільного. Наприклад, 2D інтерпретація зводиться до врахування впливу свердловини і деякого врахування впливу вміщуючих порід і вже потім до вирішення 1D задачі. По суті, в них був закладений принцип наближеної факторизації (через відсутність іншої можливості), але закладений, відповідно до розвитку обчислювальних можливостей тих років, не зовсім кількісно (а подекуди і якісно) точно.

У контексті розв'язання обернених задач ЕК та ІК, не можна не розглянути алгоритми розв'язання 2D задачі ЕК та ІК Л.С. Кнеллера та ін. (Кнеллер, Потапов, 1989а; 1989б; 1990; 1992), що засновані на систематичному підборі параметрів складних геоелектричних моделей. У цих роботах розвинений підхід, в якому задача визначення шуканого ПО розглядається як задача на мінімізацію цільової функції, яка вирішується методами нелінійного програмування. Необхідно зауважити відразу, що цільова функція іноді мінімізується без урахування похибки кожного виміру (Кнеллер, Потапов, 1989а), а іноді з таким урахуванням (Потапов, Кнеллер, 1990).

Проте було відмічено, що реалізація розв'язання подібних ітераційних процесів, на кожному кроці якого розв'язується СЛАР прямої задачі, може бути неефективною з двох причин: 1) розрахунок матриці чутливості, у зв'язку з багатомірністю, вимагає неприйнятних витрат часу ЕОМ; 2) значний час потрібен також для моделювання вимірювання по двовимірній прямій задачі на кожному кроці ітераційного процесу.

З огляду на ці дві непереборні проблеми, був запропонований наступний підхід (Потапов, Кнеллер, 1990): на перших кроках ітерації наближений розв'язок будується методом верифікації (мультиплікація по

вертикальній і радіальній осях в ЦСК), коли ж значення дисперсії (між значенням вимірів зондів і розрахованими значеннями) перестають зменшуватися в ході ітерації, як метод розв'язання прямої задачі вже розглядається двовимірною задачею. Автори оцінили збіжність такого процесу в 3-5 ітерацій, при цьому розв'язок знаходиться при одному застосуванні алгоритму для двовимірної задачі на останньому кроці.

Для створення програмного забезпечення, що реалізує розв'язання оберненої задачі для апаратури трьохзондового «псевдобоківого каротажу», пропонується побудова певної моделі шляхом вибору 1D палетки, найбільш «близької» до значень вимірів зондів. Слід зауважити, що для систем БК (фокусованого каротажу) такий підхід обґрунтований у двох випадках: якщо потужність пласта більше вертикальної роздільної здатності («потужності фокусування») і якщо задача стійка на всьому діапазоні зміни параметрів моделі.

Слід також згадати програму «Геопошук» (Красножон та ін., 2009), в якій використовується попластова обробка так, що в межах кожного пласта відбувається автоматичний вибір (за допомогою заздалегідь розрахованої таблиці) значень параметрів моделі, які найбільше відповідають (в тій чи іншій метриці або за іншими ознаками) даним вимірюванням.

### **1.3. Кількісна інтерпретація каротажу на рубежі тисячоліть**

Підсумовуючи викладене, можна дійти висновку, що згадана на початку п. 1.2 формалізація ідеї процесу інтерпретації Н.Н. Сохранова і С.М. Аксельрода (Сохранов, Аксельрод, 1984) в цілому стала основною при створенні алгоритмів розв'язання обернених задач.

Головне, що було потрібно мати на увазі, – результатом повинно стати не значення виміру, а остаточний результат розв'язку оберненої задачі. Першим цю тезу послідовно обґрунтував ще Комаров С.Г. (Комаров, 1956), який ввів поняття «інтерпретаційна метрологія», тобто необхідність вироблення вимог до точності виміру, яка забезпечить необхідну точність розв'язання оберненої задачі. Але час практичного впровадження настав лише з досягненням обчислювальними ресурсами необхідного рівня, що сталося на рубежі тисячоліть.

Отже, на перший план поступово стала виходити точність розв'язання оберненої задачі, а не точність виміру.

Але поки розвиток ЕОМ ще не набув широкодоступних необхідних потужностей для відповідної реалізації алгоритмів оберненої задачі,

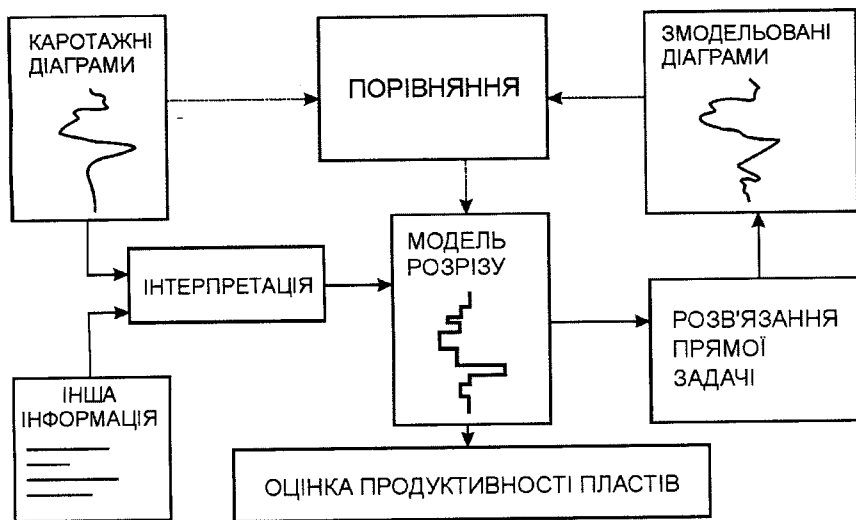


Рис. 1.2. Схема ефективного розв'язання оберненої задачі

фактично існувало два види розв'язання оберненої задачі: теоретично-розроблений і той, що використовувався на практиці.

Що собою являв теоретично-розроблений алгоритм?

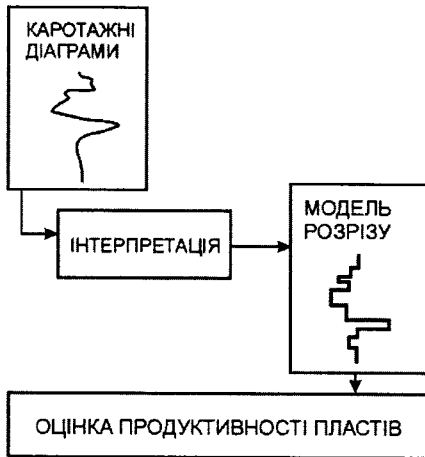
Це був ітераційний процес (рис. 1.2), який включав таку послідовність дій:

1. за даними інтерпретації реальних каротажних діаграм конкретних зондів будується модель розрізу;
2. моделювання кривих УО зондів для побудованої моделі розрізу (розв'язання прямої задачі);
3. оцінка «близькості» реальних каротажних діаграм із змодельованими;
4. при незадовільній оцінці «близькості» уточнення моделі розрізу і повернення до п.2.

Така послідовність вимагала постійного розв'язання прямої задачі, що було майже нездійснено практично на початку 2000-х років.

Навіть коли вже починали з'являтися широкодоступні комп'ютери, що дозволяли з прийнятною точністю швидко розв'язувати прямі задачі, необхідно було чекати, доки відповідні алгоритми розв'язання будуть реалізовані під ці потужності і належним чином протестовані.

Отже на практиці впродовж років реалізовувався інший алгоритм (рис. 1.3) розв'язання оберненої задачі.



**Рис. 1.3.** Використовувана на практиці схема розв'язання оберненої задачі

самого БКЗ зондом визначити положення границь пластів і відповідно потужність кожного з них.

Пластами великої потужності при цьому вважали пласти з потужністю  $h > 15-20$  м, а малої потужності – пласти з  $h < 6$  м. У залежності від типу потужності кожного пласта для кожного зонда зіставляли величину його УО (якщо пласт вважався великої потужності, то брали середній УО, для пласта середньої потужності, який є високоомним, брали максимальне значення УО тощо).

Далі відбувався процес ручної інтерпретації. Тобто криву УО зондів, побудовану в залежності від їх довжини, спочатку накладають і переміщують по двохшаровій палетці (див., наприклад, рис. 1.4). Якщо фактична крива збігається з двохшаровою теоретичною кривою або вкладається між двома сусідніми розрахунковими кривими БКЗ, повторюючи їх форму, то робиться висновок, що аналізований пласт є непроникним (у разі наявності підвищуючого або знижуючого проникнення фактичні криві не збігаються з теоретичними).

Тобто така двохшарова палетка наближено пов'язує значення УО різних зондів із значенням ПО у відсутності проникнення. Отже, якщо вважалось, що потужність даного пласта нескінченна (на каротаж навпроти даного пласта не впливають сусідні), то для кожного зонда (за допомогою

Фактично це послідовність названих вище кроків, але урізана таким чином, аби уникнути ітераційного процесу, що вимагає постійного розв'язання прямої задачі. При цьому сама інтерпретація може відбуватись (і, як правило, відбувалась) наближено, тобто за допомогою наближених палеток.

Продемонструємо це на прикладі БКЗ (Латышова, 1981; Курганський, Тішаєв, 2011).

Спочатку в інтервалі проведення каротажу необхідно було визначити ПО свердловини  $\rho_c$  та її фактичний діаметр. Потім за допомогою допоміжних методів (ПС чи мікрометодів) чи обраним з числа

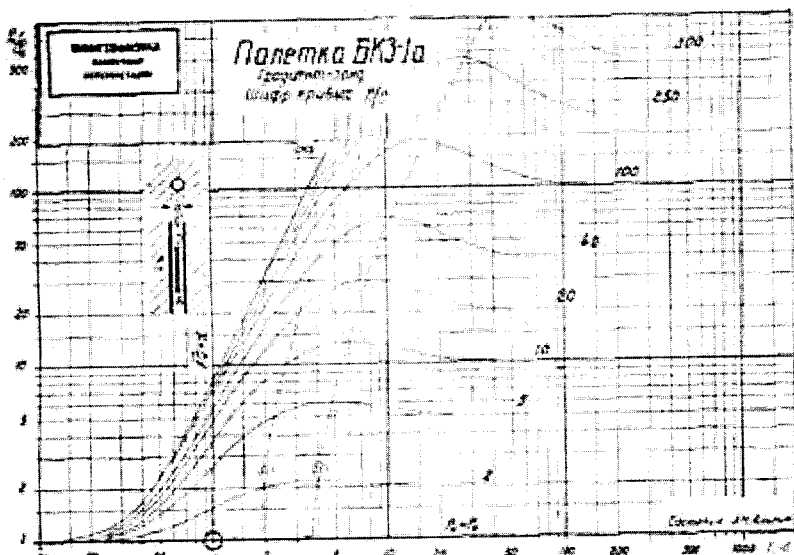


Рис 1.4. Приклад двошарової палетки БКЗ для градієнт-зондів (БКЗ-1а за Альпінім)

поняття «ефективна довжина зонда»  $L$ , причому різним за геометрією і характеристиками зондам може відповідати одне і те саме значення цього параметра) будували точку на палетці (у величинах УО, нормованого на ПО свердловини) і потім для отриманого набору точок, що відповідають всім зондам каротажного комплексу, знаходили найближчу каротажну криву, шифр якої і буде шуканим значенням ПО пласта (нормованого на ПО свердловини).

Якщо ж за такою процедурою пласт не вважався непроникним, то для того щоби визначити три параметри, якими характеризується його провідність, потрібно вживати інший підхід, що використовує вже не одну палетку, а їх набір.

Кожна крива (див., наприклад, рис. 1.5) на кожній палетці з набору, аналогічно двошаровій, зображає залежність  $\tilde{\rho}/\rho_c$  від відносного розміру зонда  $L/d$ , але при різних заданих параметрах  $D/d$ ,  $\rho_3/\rho_c$ ,  $\rho_{II}/\rho_c$ , з яких перші два відображають шифр палетки, третій – шифр кривої.



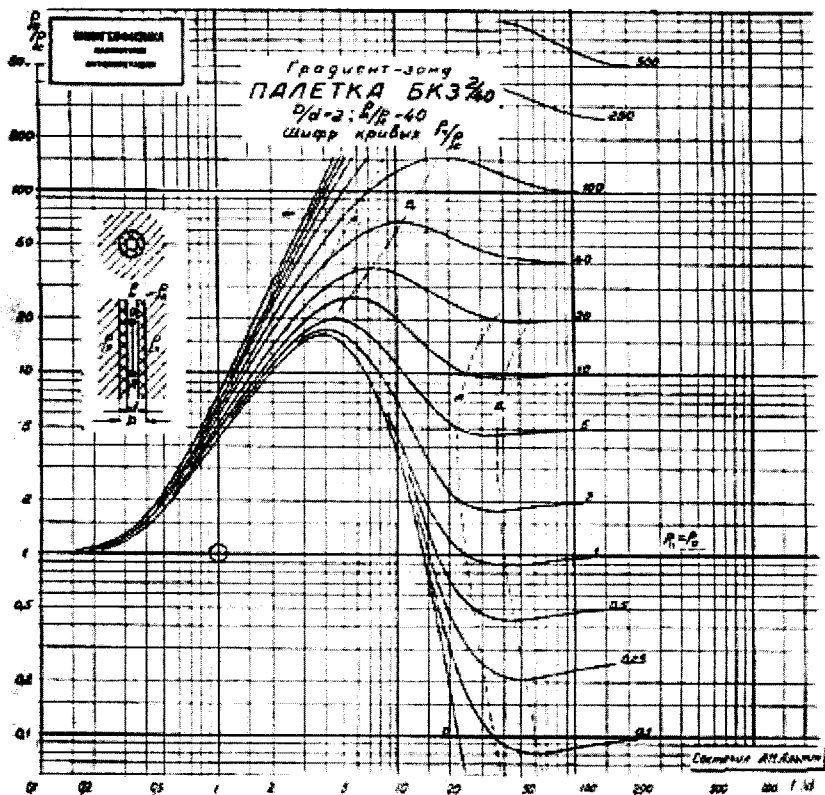


Рис. 1.5. Приклад палетки БКЗ для градиент-зондів (БКЗ-2/40 за Альпінім)

Наприклад, палетка, зображена на рис. 1.5, з шифром 2/40 означає, що на ній представлено набір кривих залежностей  $\frac{\tilde{\rho}}{\rho_c}$  від  $\frac{L}{d}$  при  $\frac{D}{d} = 2$  та  $\frac{P_z}{\rho_c} = 40$ .

Точність такої інтерпретації важко навіть оцінити, але альтернатива була відсутня до початку 2000-х років.

Описати цю процедуру інтерпретації, яка донедавна була широко вживана, необхідно для розуміння недоліків, позбутись яких і постала наступна задача в процесі розвитку електрометрії.

Якщо спробувати формалізувати тільки деякі основні недоліки описаної інтерпретації (для подальшого розгляду шляхів їх подолання), необхідно вказати на такі:

1. Не враховується належним чином вплив сусідніх пластів на інтерпретацію в малопотужних.

2. Наявний людський фактор при ручній обробці та інтерпретації даних.

3. Неоднозначність (і відповідно наближеність) процедури вибору значення УО для кожного зонда в досліджуваному пласті скінченної потужності.

4. Використання принципово наближеного значення коефіцієнтів зондів (вносить неусувну похибку в інтерпретацію даних ЕК).

І головне:

5. Принципово наближений характер методу «розв'язання прямої задачі», тобто способу встановлення зв'язку УО конкретного зонда з параметрами середовища.

Окрім того, поставала низка інших питань, таких як: вплив ексцентриситету (положення зонда у свердловині); можливість впливу анізотропії; обмеження, які накладає вибір тришарової моделі (як показує практика, реально не завжди саме ця модель адекватно описує просторовий розподіл провідності пласта, розкритого свердловиною) тощо.

Тобто існують фактори, які не враховані у наведеному способі і, отже, вказують на неточність результатів, що ним отримуються.

## ЕЛЕКТРИЧНИЙ КАРОТАЖ

### 1.1. Потенціал-зонди та градієнт-зонди

Суть найпростішого ЕК полягає у наступному (рис. 2.1): чотири електроди А, М, N і В (вважаються точковими), розділені між собою ізоляторами, розміщуються у свердловині (вважається, що на осі свердловини). Струм  $I$ , який протікає між електродами А і В (електрод А у такій схемі прийнято називати прямим струмовим, електрод В – оберненим струмовим), проходить через буровий розчин і навколосвердловинний простір. Величина вимірної різниці потенціалів  $U_{MN}$  між електродами М і N передається на поверхню, де і фіксується. Таким чином, використовуючи величину сили струму  $I$ , можна розрахувати деяку величину

$$R_K = \frac{U_{MN}}{I} \quad (\text{розмірності опору}$$

Ом), помноживши яку на деякий

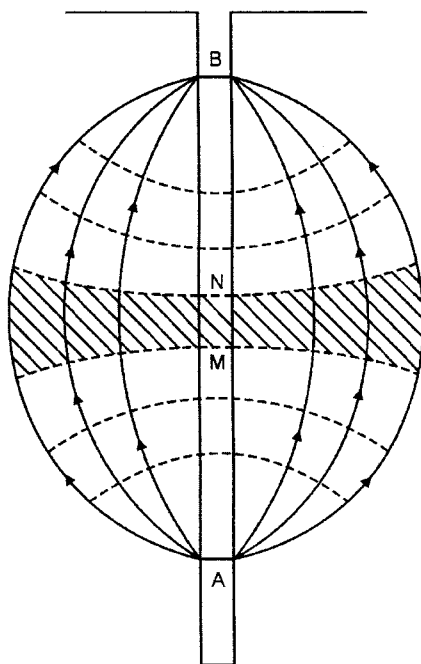


Рис. 2.1. Найпростіша схема ЕК

коефіцієнт  $K$  (розмірності довжини м), можна отримати деяку величину  $\bar{\rho}$  (розмірності Ом·м):

$$\bar{\rho} = KR_K = K \frac{U_{MN}}{I}, \quad (2.1.1)$$

Ця величина була названа уявний опір (УО), а коефіцієнт  $K$  – коефіцієнтом зонда. Було також встановлено, що для такого каротажу  $K$  залежить тільки від взаємного розташування електродів А, М, N, В, а  $\bar{\rho}$ , в основному від ПО шару між електродами MN (див. рис. 2.1).

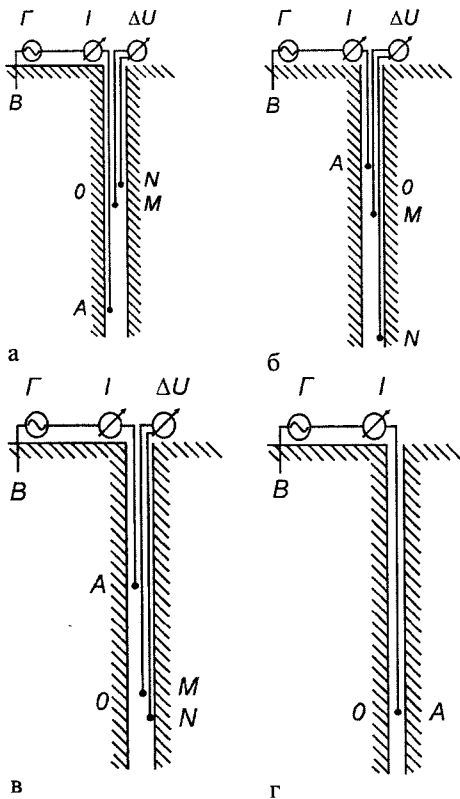
Таке введення поняття УО допомагає дати йому чітке визначення: УО – це істинний ПО такого нескінченного однорідного ізотропного середовища, в якому при заданих відстанях між електродами зонда і постійній силі струму виникає така сама різниця потенціалів, як і в досліджуваному неоднорідному середовищі.

Легко показати, що при взаємній заміні місцями пар електродів А, В та М, N – результат виміру не зміниться (в неоднорідному середовищі також).

Це також впливає із загальної формули для розрахунку коефіцієнта будь-якого нефокусованого зонда, що складається з чотирьох електродів (Миронцов, 2003):

$$K = 4\pi \left( \frac{\overline{MA} - \overline{BM}}{MA \cdot BM} - \frac{\overline{NA} - \overline{NB}}{NB \cdot NA} \right)^{-1} \quad (2.1.2)$$

Одразу після перших вдалих експериментів братів Шлюмберже було відзначено, що зонди з різними відстанями між електродами мають різну глибину дослідження (глибинність). Ця властивість була покладена в основу створення багатозондових комплексів, що складаються з різних зондів різної глибини дослідження і відповідно дозволяють проводити зондування провідності вздовж пласта, і тим самим оцінювати його фільтраційні властивості. Основні типи зондів, з яких склалися такі комплекси, можна умовно поділити на різні типи (див. рис. 2.2.), наприклад: а – трьохелектродний покрівельний (обернений) градієнт-зонд, б – трьохелектродний послідовний потенціал-зонд, в – трьохелектродний підшовний (послідовний) градієнт-зонд, г – одноелектродний зонд токового каротажу (його ще називають зондом «заземлення», метод – методом струмів, а якщо токовий електрод знаходиться у безпосередньому гальванічному контакті зі стінкою свердловини, то – методом ковзних контактів).



**Рис. 2.2.** Різна геометрія нефокусованих зондів ЕК (Г – генератор, О – точка запису)

відстань між електродами А і М (або відповідними парами при взаємній заміні  $A \leftrightarrow M, B \leftrightarrow N$ ). У граничному випадку, коли відстань між електродами М і N прямує до нуля, градієнт-зонд називають ідеальним градієнт-зондом.

У літературі для зручності використовують різні класифікації зондів: за кількістю струмових електродів, що розташовуються у свердловині, зонди поділяють на однополюсні (у свердловині знаходиться один струмовий електрод А) і двополюсні (у свердловині знаходяться обидва струмових електроди А і В); за порядком розташуванням вимірювальних електродів відносно струмового зонди поділяють на послідовні (підшовні) та обернені

Обернений потенціал-зонд можна не розглядати окремо, оскільки потенціал-зонди відносяться до квазісиметричних, тобто характеристики яких майже не залежать від того, з якого боку від А знаходиться пара вимірювальних електродів MN, на відміну від градієнт-зондів, вертикальні характеристики яких суттєво залежать від того, з якого боку від А знаходиться пара вимірювальних електродів.

Взагалі потенціал-зондами прийнято називати такі зонди, в яких відстань між вимірювальними електродами М та N є більшою, ніж відстань між електродами А і М (або відповідними парами при взаємній заміні  $A \leftrightarrow M, B \leftrightarrow N$ ). У випадку, коли N розміщено на нескінченності (на поверхні), потенціал-зонд називають ідеальним потенціал-зондом.

На відміну від потенціал-зондів, градієнт-зондами прийнято називати такі зонди, в яких відстань між електродами М і N є набагато меншою, ніж

(покрівельні).

Треба розуміти, що такий опис є ідеалізованим, а ідеалізовані описи, як правило, виявляються далекими від того, що існує реально. Наприклад, в апаратурі, що використовується в Україні, обернений струмовий електрод В градієнт-зондів і потенціал-зондів реально знаходиться не на нескінченності, а безпосередньо у свердловині на відстані приблизно 20 м від електрода А і представляє собою провідне облєтєння каротажного кабелю.

Кожному зонду прийнято приписувати три цифрові характеристики: вже згадуваний коефіцієнт зонда (див. (2.1.1), (2.1.2)); довжину зонда ( $L$ ) та точку запису ( $O$ ) – координату точки, до якої відноситься результат запису вимірюваної величини  $UO$ .

Довжину зонда використовують для порівняння умовної глибини дослідження різних зондів. Умовної тому, що задача ЕК є нелінійною, що не дозволяє ввести об'єктивну й інформативну характеристику глибинності дослідження. Реальна глибина буде залежати від відношення ПО свердловини до ПО досліджуваної породи, розкритої свердловиною, та від величини діаметра свердловини.

Для градієнт-зондів за довжину приймають відстань від електрода А до точки запису  $O$  (середини інтервалу між вимірювальними електродами  $M$  і  $N$ ). Для потенціал-зондів довжиною зонда є відстань між електродами А та  $M$ , посередині якої знаходиться точка запису.

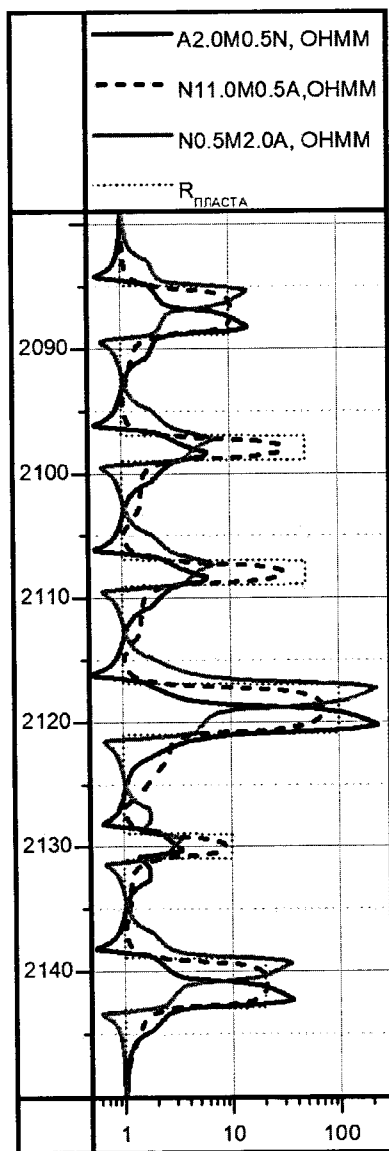


Рис. 2.3. Приклад діаграм різних градієнт-зондів

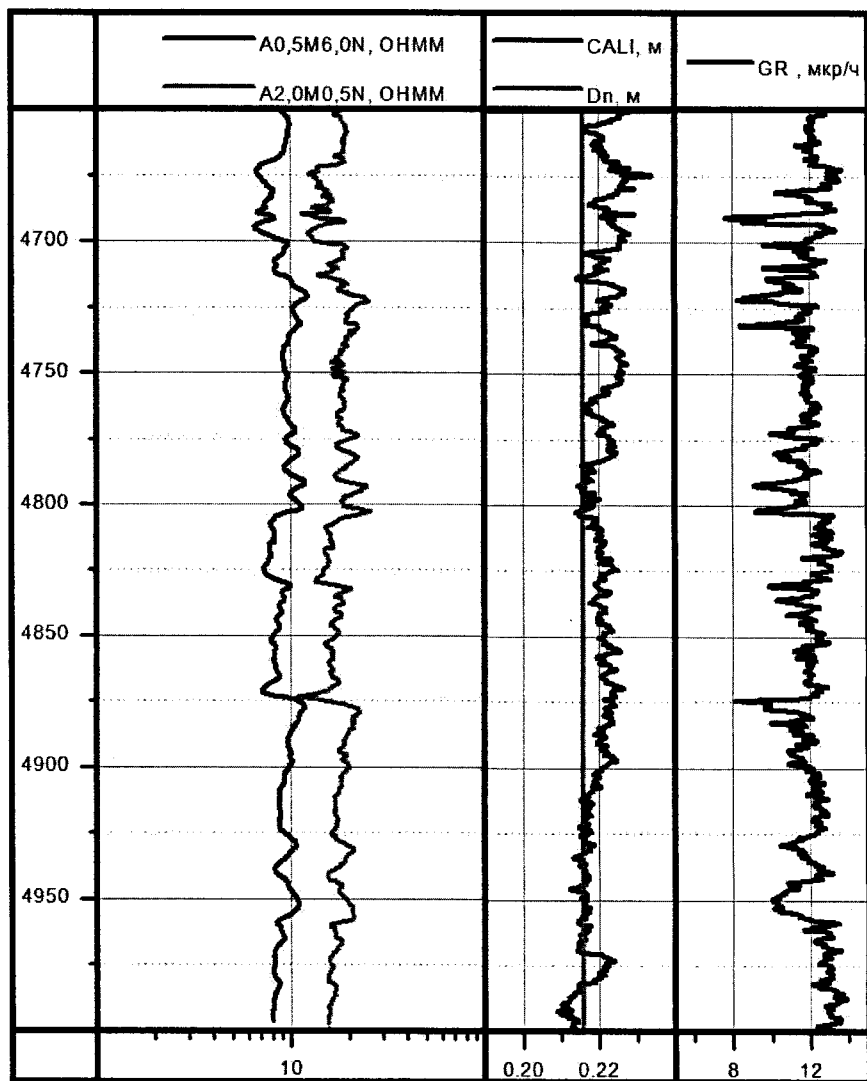


Рис. 2.4. Приклад стандартного каротажу ЕК

Градiєнт-зонди та потенціал-зонди позначаються великими літерами А, В, М, N у порядку розміщення електродів згори до низу. Цифри між літерами відповідають відстані між відповідними електродами. Наприклад,

A1.0M0.1N – однополюсний послідовний градієнт-зонд, відстані між електродами А та М і М та N дорівнюють 1.0 м і 0.1 м відповідно. Відсутність літери В означає, що електрод В вважають таким, що знаходиться на нескінченності. Хоча, як вже зазначалось, завжди за написом A1.0M0.1N чи подібним слід розуміти такий: A1.0M0.1N18.9B (якщо відстань між А та В дорівнює 20 м).

Взагалі, на характеристики зонда впливає не тільки його розмір, але і розташування його електродів (тип зонда). Так, на рис. 2.3 наведено криві, що відповідають трьом різним зондам, що складають одну з можливих модифікацій так званого «стандартного» каротажу.

Для зручності всі потенціал-зонди та градієнт-зонди ми будемо називати нефокусованими зондами (на відміну від зондів бокового каротажу).

Розглянемо два основних комплекси, які утворені з нефокусованих зондів і які широко використовуються у вітчизняній геофізиці та у геофізиці країн близького зарубіжжя до цього часу (в інших країнах від нефокусованих зондів (Anderson, 2001) давно відмовились).

Перший з цих комплексів – стандартний каротаж, який було розроблено як еталон для порівняння між собою діаграм УО, отриманих в різних свердловинних розрізах (рис. 2.3, 2.4).

У більшості нафтогазоносних провінцій (наприклад Західно-Сибірській, Дніпрово-Донецькій, Передкавказькій та ін.) в якості стандартного застосовується один послідовний градієнт-зонд A2.0M0.5N (чи два одночасно – і прямий, і обернений: A2.0M0.5N та N0.5M2.0A) та один з трьох потенціал-зондів (чи його обернений варіант): N6.0.M0.5A, N8.0M0.5A, N11.0M0.5A.

І хоча сама назва методу «стандартний» свідчить про його поширеність, слід відзначити й недолік – даних його виміру недостатньо для вирішення оберненої задачі. Також і глибинність його дослідження для досить поширених свердловинних умов не завжди є достатньою, щоби «відчувати» область пласта, неушкоджену фільтратом бурового розчину в продуктивних пластах з великою зоною проникнення. Крім того, у варіанті всього двох зондів їх кількості недостатньо для визначення трьох невідомих геоелектричних параметрів пласта з проникненням.

Проте інформацію для загального уявлення про будову розрізу такий стандартний комплекс надає.

Іншим поширеним методом є так зване бокове каротажне зондування (БКЗ). До нього звичайно включають: N6.0M0.5A, A0.4M0.1N, A1.0M0.1N, A2.0M0.5N, A4.0M0.5N, A8.0M1.0N, N0.5M2.0A. Тобто один потенціал-зонд, 5 послідовних градієнт-зондів і один обернений до них градієнт-зонд.



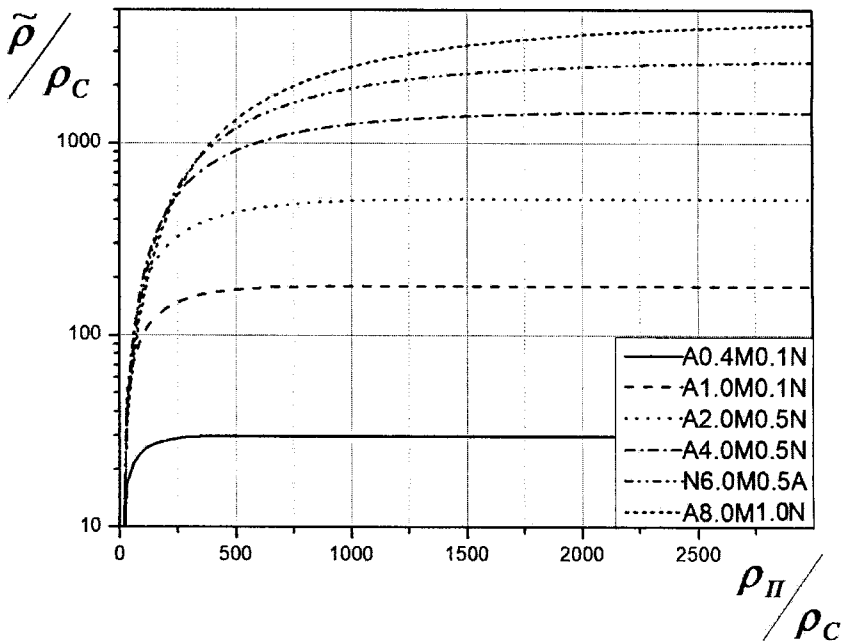


Рис. 2.5. Залежність  $\tilde{\rho} / \rho_c$  від  $\rho_{II} / \rho_c$  для зондів БКЗ ( $d = 0.216$  м)

З математичної точки зору в цьому комплексі достатньо зондів для того, щоби визначати шість різних геоелектричних параметрів кожного пласта. Але на практиці ситуація дещо складніша.

У цього комплексу є два неусувні недоліки.

Перший недолік комплексу БКЗ – суттєве обмеження діапазону виміру УО, що викликано екрануючим впливом свердловини.

Дійсно, як це показано на рис. 2.5, при ПО бурового розчину  $0.1 \text{ Ом} \cdot \text{м}$  зонд А0.4М0.1Н не здатен вимірювати ПО пласта більше  $3 \text{ Ом} \cdot \text{м}$ , зонд А1.0М0.1Н – більше  $11 \text{ Ом} \cdot \text{м}$ , зонди А2.0М0.5Н та N0.5М2.0А – більше  $50 \text{ Ом} \cdot \text{м}$  і т.д. Крім того, при зменшенні ПО бурового розчину ці границі виміру ПО пласта будуть ще більше знижуватись.

Другий недолік комплексу БКЗ – недостатня вертикальна роздільна здатність для дослідження малопотужних продуктивних пластів.

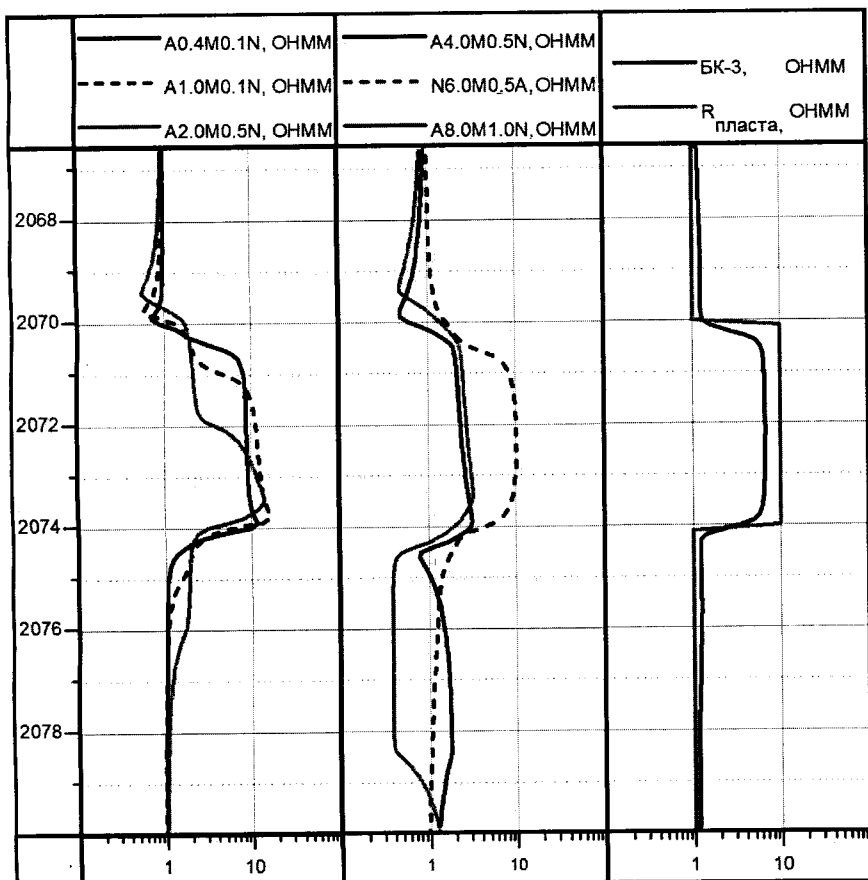


Рис. 2.6. Діаграми БКЗ та БК-3 для поодинокого пласта без зони проникнення, розкритого свердловиною ( $\rho_c = 1 \text{ Ом}\cdot\text{м}$ )

Щоби оцінити цей недолік, розглянемо чотири простих розрізи: перший, що містить поодинокий пласт без проникнення потужністю 4 м (рис. 2.6); другий, що містить пачку з трьох пластів без проникнення, кожен потужністю 4 м (рис. 2.7); третій, що містить пачку з трьох пластів підвищуючого проникнення, кожен потужністю 4 м (рис. 2.8); четвертий, що містить пачку з трьох пластів із знижуючим проникненням, кожен потужністю 4 м (рис. 2.9).

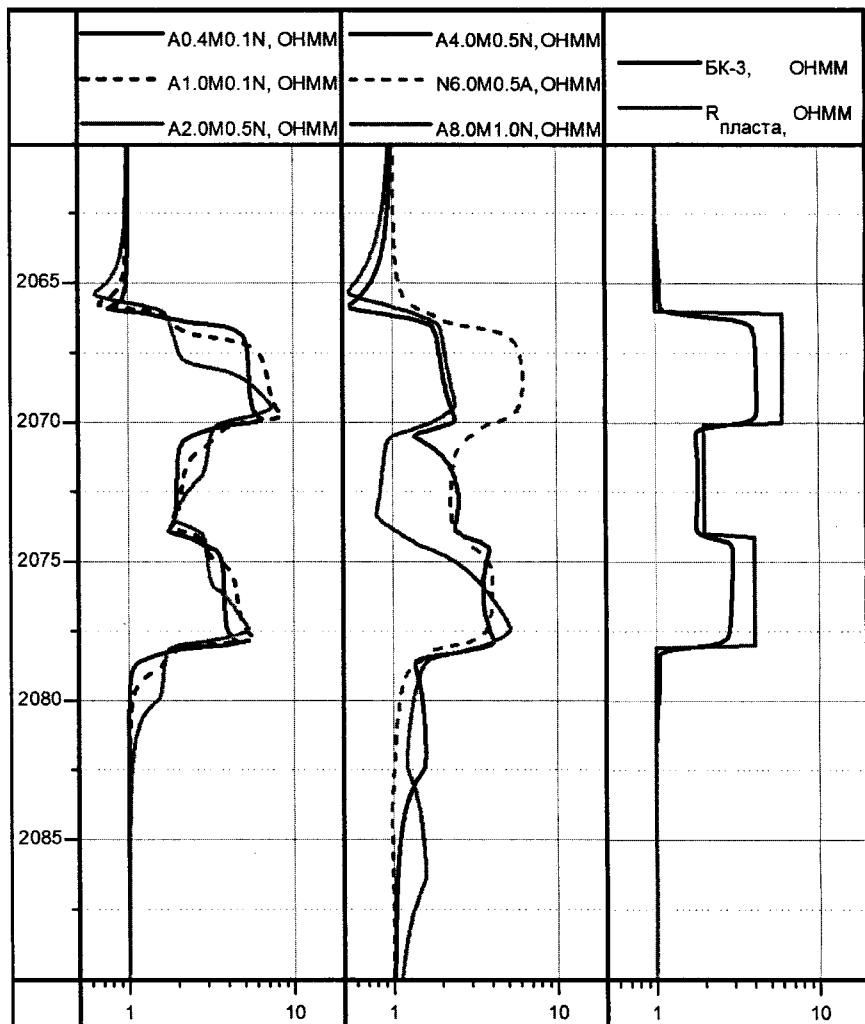


Рис. 2.7. Діаграми БКЗ та БК-3 для пачки трьох пластів без зони проникнення, розкритих свердловиною ( $\rho_C = 1 \text{ Ом}\cdot\text{м}$ )

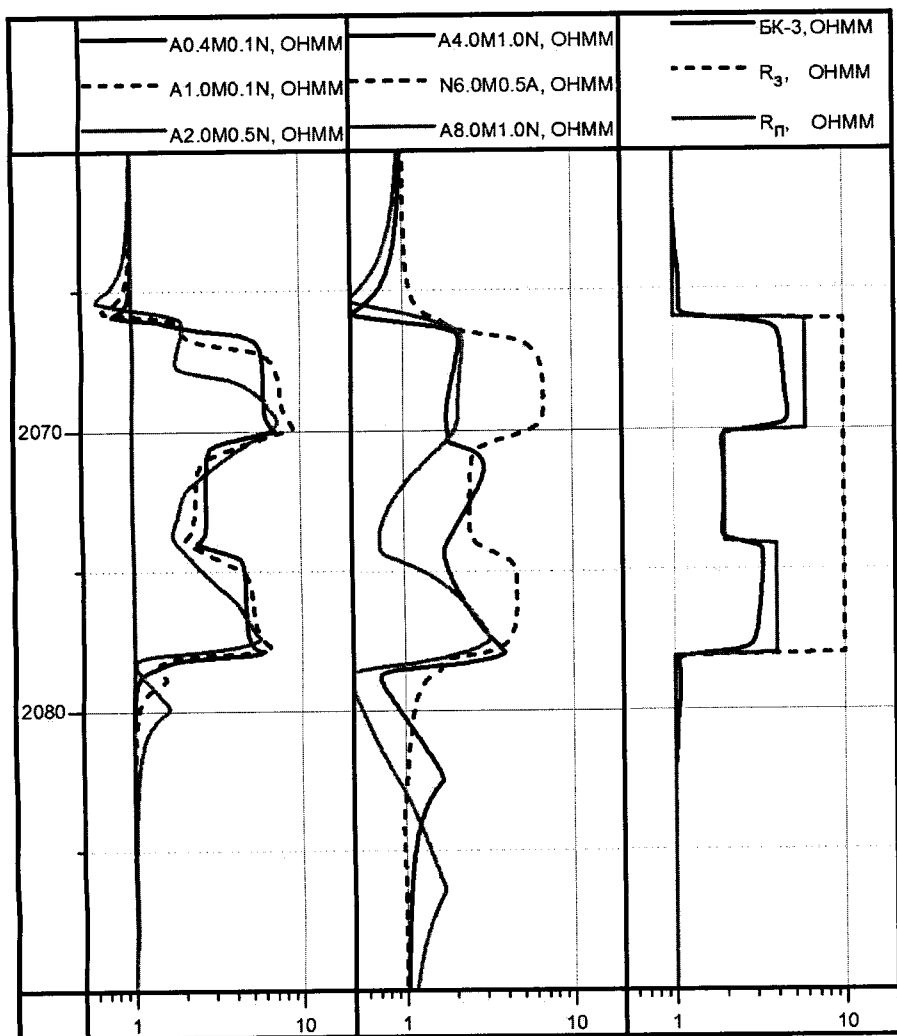


Рис. 2.8. Діаграми BKЗ та BK-3 для пачки трьох пластів, розкритих свердливиною, із зоною проникнення ( $\rho_c = 1 \text{ Ом}\cdot\text{м}$ ,  $D/d = 6$ )

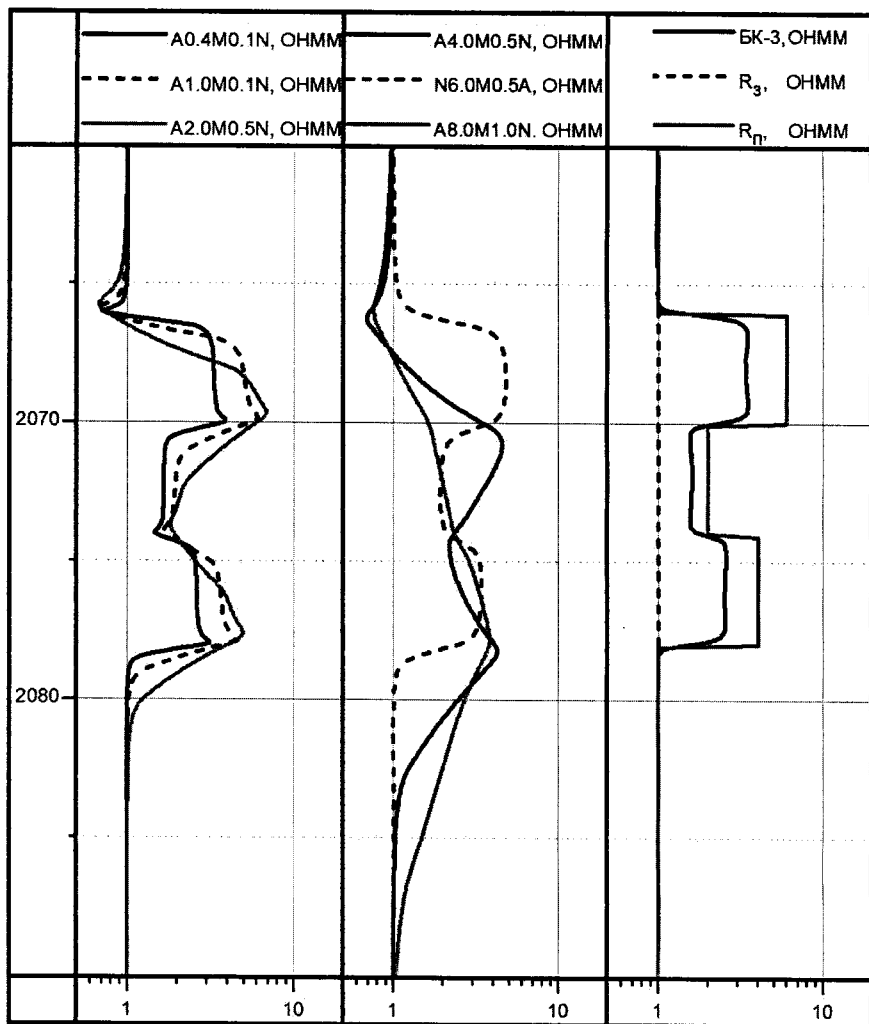


Рис. 2.9. Діаграми BKЗ та BK-3 для пачки трьох пластів, розкритих свердловиною, із зоною проникнення ( $\rho_c = 1 \text{ Ом}\cdot\text{м}$ ,  $D/d = 6$ )

Очевидно, що наведені криві вельми приблизно описують задані моделі. Насамперед це відбувається завдяки значному спотворенню УО поблизу положень горизонтальних границь пластів.

Дослідження явища спотворення значень УО поблизу границь пластів та взагалі оцінку вертикальної роздільної здатності методу ЕК ми відкладемо до глави 5, поки ж коротко опишемо спосіб, яким було підвищено вертикальну роздільну здатність ЕК. Також завдяки цьому способу значно збільшується діапазон виміру УО (зменшується вплив свердловини на вимір).

## 2.2. Боковий каротаж

Напевно, самий простий зонд бокового каротажу, який ілюструє сам принцип фокусування, це так званий трьохелектродний зонд БК. Він складається з трьох електродів Ab, A, At (рис. 2.10.a), провідні поверхні яких мають рівний потенціал, відносно потенціалу оберненого віддаленого на нескінченність електрода В. Електрод А в такій геометрії називають центральним, Ab, At – екранними. При цьому вимірюється струм електрода А і різниця напруги між А і нескінченно віддаленою точкою (електрод N). Таким чином, величина УО, що вимірюється:

$$\tilde{\rho} = K_3 \frac{U_{A\infty}}{I_A}, \quad (2.2.1)$$

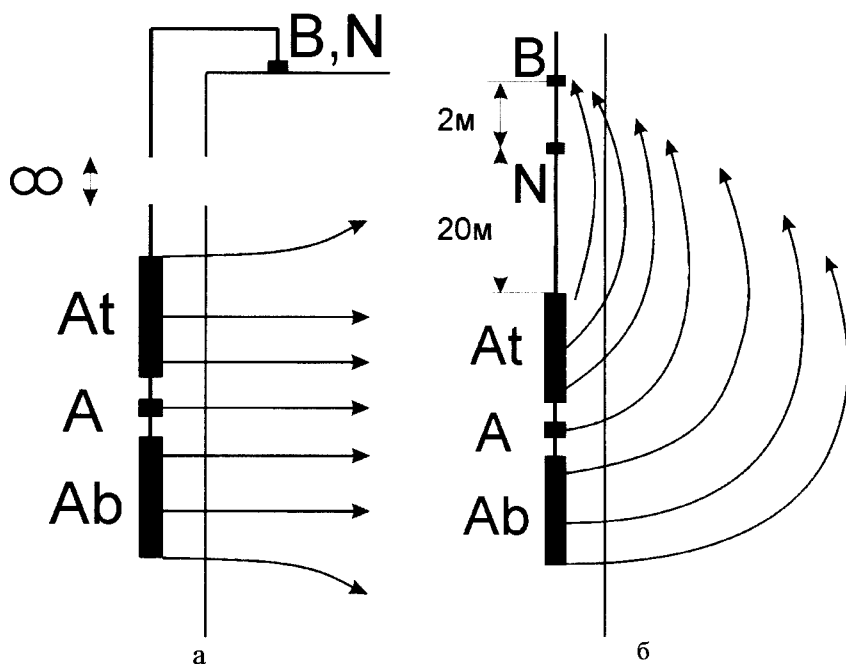
де  $K_3$  – коефіцієнт зонда, визначається в основному ПО шару, що знаходиться навпроти електрода А.

Це досягається тим, що вертикальна складова вектора щільності струму на поверхні А вважається рівною нулю (провідні поверхні А, At, Ab з'єднані провідником нескінченно малого опору – на практиці близько 0,01 Ом, або використанням автокомпенсатора, що регулює співвідношення між силою струмів центрального і екранних електродів таким чином, щоб різниця потенціалів між ними дорівнювала нулю (на практиці – мала мінімальну величину модуля)).

Такий принцип каротажу не дозволяє свердловині екранувати породу, також на вимір УО пласта значно зменшується вплив вміщуючих порід, тому такий метод має перевагу перед будь-яким нефокусованим.

Але і БК має свої недоліки.

По-перше, не вдається досягти абсолютної рівності потенціалів електродів А, At, Ab (в силу скінченного значення опору з'єднання між ними



**Рис. 2.10.** Принцип бокового каротажу БК-3:

*а – ідеальна модель, б – модель з реальними (скінченними відстанями до обернених електродів)*

або через неточну автокомпенсацію), що призводить до спотворення результату виміру (Чукин та ін., 1976), особливо при великих значеннях відношення ПО досліджуваної породи до ПО бурового розчину.

По-друге, в реальному випадку обернений електрод В не віддалений на нескінченність, а розташований на провідному облєтєнні каротажного кабелю (так само, як і у зондів БКЗ), що реально знаходиться на відстані близько 20 м від електрода А. Це призводить в свою чергу до впливу порід, що вміщують досліджуваний пласт, на результат дослідження його опору, оскільки лінії струму викривляються в бік оберненого електрода (рис. 2.6.б).

По-третє, виникає проблема вимірювання напруги струмового електрода, що технічно абсолютно точно зробити не можливо. І якщо у нефокусованих зондах така проблема не виникає, тому що струмові і вимірювальні електроди принципово просторово рознесені, то у БК сама

ідеологія побудована на тому, що повинен вимірюватись потенціал центрального електрода відносно потенціалу нескінченно віддаленого оберненого струмового електрода (саме в рамках такого припущення використовується формула (2.2.1)).

По-четверте, такий принцип не дозволяє виконати різноглибинне дослідження провідності, оскільки сам принцип БК теоретично передбачає тільки одну глибину дослідження, яка не залежить від зміни розмірів електродів чи відстаней між ними.

Однак спроби подолати останній недолік викликали появу різних двох-і навіть більше зондових модифікацій БК, які коректніше називати «псевдо-боковий каротаж», але за традицією будемо такі модифікації все одно відносити до БК.

В основу таких модифікацій якраз і покладено другий недолік БК, а саме те, що його обернений електрод знаходиться на скінченній відстані від електродів А, At, Ab.

Розглянемо для початку двозондовий БК, відомий під назвою БК2 (рис. 2.11). У цій апаратурі фактично в одній геометрії поєднано два різноглибинних зонди БК. Один відповідає класичному трьохелектродному БК (БК2б), а інший має меншу глибинність (БК2м).

Це реалізується за допомогою двох незалежних режимів живлення і вимірювання.

У першому режимі всі електроди Ab2, Ab1, А, At1, At2 мають однаковий потенціал відносно оберненого, який вважається віддаленим на нескінченність. Фактично, як це можна бачити, порівнюючи характер розповсюдження струму (рис. 2.11.а та рис. 2.10.а), цей режим є принципово еквівалентним режиму трьохелектродного зонду. Його УО обчислюється за формулою:

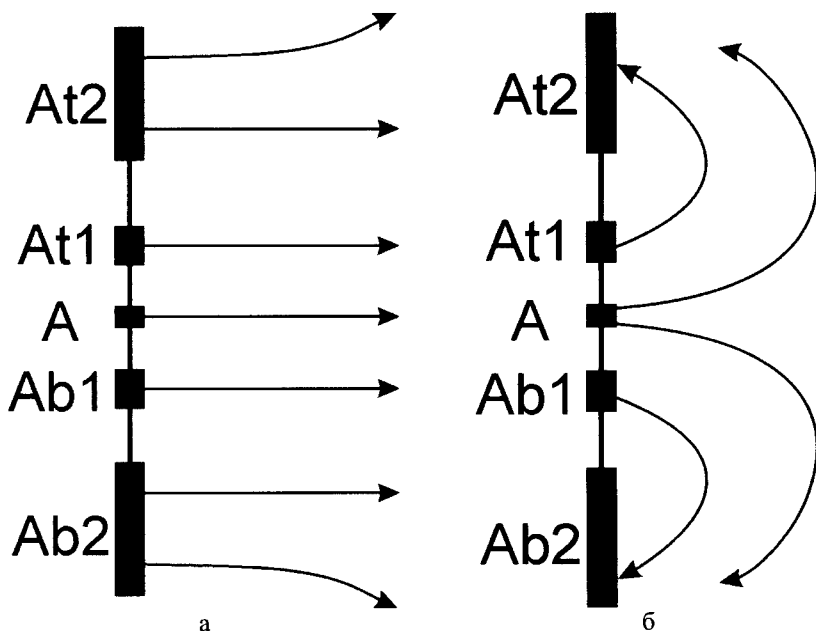
$$\tilde{\rho} = K_{2Б} \frac{U_{A\infty}}{I_A},$$

де  $K_{2Б}$  – коефіцієнт зонда БК2б.

У другому режимі електроди мають однаковий потенціал Ab1 та At1 відносно обернених електродів Ab2 та At2 (рис 2.11.б). Такий зонд, як це легко бачити, має меншу глибинність, ніж трьохелектродний чи БК2б, але і гіршу вертикальну роздільну здатність.

УО такого зонда обчислюється за формулою:





**Рис. 2.11.** Принцип подвійного бокового каротажу БК2:  
*а* – БК2б (великий зонд), *б* – БК2м (малий зонд)

$$\tilde{\rho} = K_{2M} \frac{\Delta U}{I_A},$$

де  $K_{2M}$  – коефіцієнт зонда БК2м,  $\Delta U$  – різниця потенціалів між електродом А та електродами Ab2 та At2 (потенціали Ab2 та At2 вважаються рівними між собою).

Треба відзначити, що технічна реалізація такого зонда є досить складною, оскільки для вирівнювання потенціалів в обох режимах використовують автокомпенсатори, що призводить до необхідності розміщення додаткових пар вимірювальних електродів між електродами Ab1, А та А, At1. По-перше, це виявляється складно конструктивно, а по-друге, в реальних свердловинних умовах рівність нулю різниці потенціалів між такими вимірювальними електродами не гарантує рівності потенціалів електродів Ab1, А, At1.

Автором свого часу була запропонована інша ідея створення багатозондового БК (МЕК-Ф).

Для цього була розглянута задача створення апаратури БК, з одного боку простої конструкції, а з іншого боку, яка має вищу вертикальну і радіальну роздільну здатність (достатню для розв'язання оберненої задачі з необхідною точністю), а також конструктивно здатна експлуатуватися в горизонтально-похилих і горизонтальних свердловинах (Миронцов, 2012d; Миронцов, 2018a).

Для цього в схему зонда БК-3 було внесено дві конструктивно простих, з точки зору виготовлення, зміни:

1. Обернений електрод В розміщено не на нескінченності, а на кінцевій відстані (в даному випадку 1 м).

2. Екранні електроди замінено сукупністю електродів геометрії, ідентичної геометрії центрального (в ідеалі такі електроди прийнято вважати точковими, але реальні розміри будуть відповідати реальному розміру центрального електрода зонда БК-3 – 0,1-0,15 м).

Таку апаратуру будемо називати МЕК-Ф (Миронцов, 2010a; 2011a; 2011b; 2011c; Murgontsov, 2010a). На рис. 2.12. представлена геометрія даної апаратури. Рівність потенціалів струмових електродів А1, ..., А7 відносно оберненого В забезпечується з'єднанням їх за допомогою шини малого опору (0,001 Ом). Слід відразу зазначити, що діаметр приладу, а відповідно і діаметр шини обмежені можливим діаметром свердловини і товщиною корпусу приладу, що накладає обмеження на частоту генератора, так як при використанні змінного струму ефективний опір шини буде вище розрахованого теоретично за формулою  $R = \rho \frac{l}{S}$  ( $\rho$  – ПО шини,  $R$  – опір шини;  $l$  – її довжина і  $S$  – перетин) внаслідок скін-ефекту. Для виміру величин УО будемо використовувати формули:

$$\tilde{\rho}_i = K_i \frac{U}{I_i}, \quad i = \overline{1, \dots, 7},$$

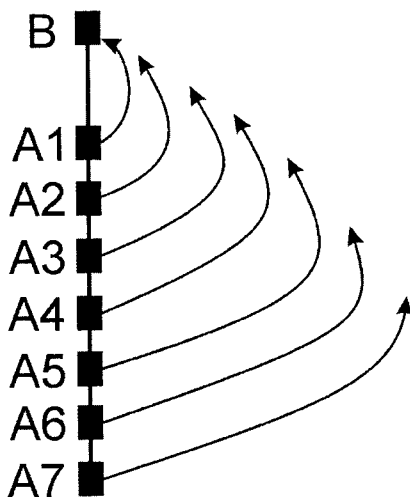


Рис. 2.12. Принцип багатозондового бокового каротажа МЕК-Ф

( $I_i$  – сила струму електрода  $A_i$ ;  $U$  – напруга генератора ( $U = const$ );  $K_i$  – коефіцієнти зондів), кожна з яких, в силу принципу не перетину траєкторій ліній струму в просторі, буде характеризувати ПО зони, віддаленої на певну відстань від стінки свердловини. Іншими словами, кожен електрод  $A_i$ , при такій схемі вимірювання, можна називати зондом БК певної глибини дослідження, так як розташування поруч з ним електродів рівного потенціалу передбачає, що вертикальна складова вектора густини його струму дорівнює нулю. Виняток становлять тільки два крайні електроди  $A_1$  та  $A_7$ , так як у них тільки з одного боку є електрод рівного з ними потенціалу. З точки зору методики запропонованого методу – вони виконують швидше технічну функцію, але на підставі виконаних розрахунків їх показання виявилися вкрай корисними для ефективного розв'язання оберненої задачі.

Спробуємо тепер порівняти фокусований та нефокусований методи, які використовують на практиці в Україні.

БК-3 – має високу вертикальну роздільну здатність (через принцип фокусування), але через це він не може надати інформації про радіальний (вздовж пласта) розподіл провідності.

Апаратура БК2 складна у виробництві, і в сучасній Україні її так і не змогли виготовити (автору відомо про успішне виготовлення аналогічної двохзондової апаратури у м. Новосибірськ компанією «Луч»).

Комплекс БК3 не є ефективним в силу низької вертикальної роздільної здатності, але кількість його зондів різної глибини дослідження може з достатньою, для розв'язання оберненої задачі, деталізацією встановлювати провідність вздовж пластів великої (значно більшої довжин зондів) потужності.

Але в багатьох випадках ми і маємо пласти великої потужності і тому може виникнути питання, а навіщо складна апаратура багатозондового БК, коли є проста, дешева і така, що себе зарекомендувала більше ніж за півсторіччя, апаратура БК3?

Відповідь проста: дані виміру БК3 є сильно чутливими до будь-яких, навіть найбільш незначних змін, параметрів свердловини (ПО, діаметр). З математичної точки зору це означає, що обернена задача БК3 може бути некоректно поставленою.

Це можна просто проілюструвати, розглянувши, нехай і занадто спрощену, але адекватну еквівалентну електричну схему БК3 і порівнявши її із еквівалентною схемою БК-3.

Як це показано на рис. 2.13, еквівалентна схема БК3 (через відсутність фокусування лінії струму будуть розходитися від електрода А в різні боки і

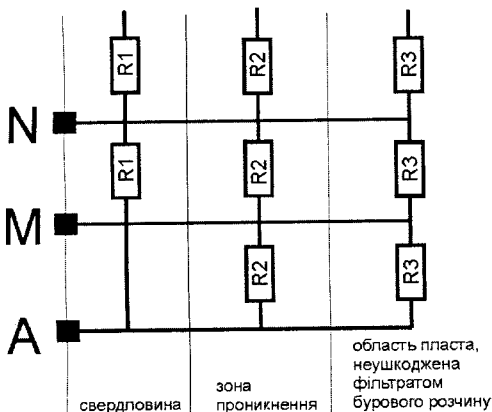


Рис. 2.13. Ілюстрація еквівалентної електричної схеми БКЗ

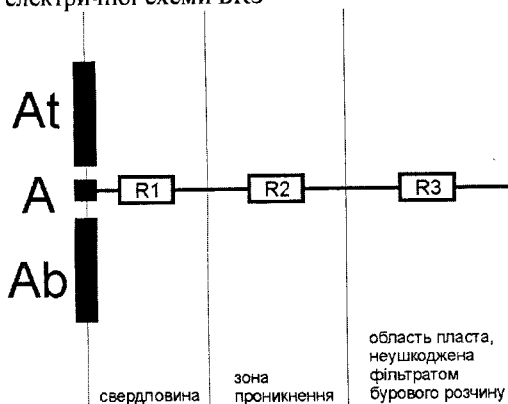


Рис. 2.14. Ілюстрація еквівалентної електричної схеми БК

комплексу БКЗ. Іншими словами задача визначення  $R_2$ ,  $R_3$  – нестійка.

Водночас, керуючись рис. 2.10, еквівалентна схема БК-3 буде такою, як це зображено на рис. 2.14, тобто послідовною. І за правилом визначення сумарного опору послідовного з'єднання, опір  $R$  пов'язаний з  $R_1$ ,  $R_2$ ,  $R_3$  простим виразом:

$$R = R_1 + R_2 + R_3. \quad (2.2.4)$$

закінчуватися на нескінченно віддаленому електроді В) буде являти собою паралельне з'єднання резисторів. Використовуючи відомий із шкільного курсу фізики вираз, що зв'язує сумарний опір такого з'єднання з опорами елементів:

$$\frac{1}{R} = \frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2} + \frac{1}{R_3},$$

можемо отримати вираз для сумарного опору:

$$R = \frac{R_1 \cdot R_2 \cdot R_3}{R_1 \cdot R_2 + R_1 \cdot R_3 + R_2 \cdot R_3}$$

Легко бачити, що при виконанні умов:

$$R_1 < R_2, \quad (2.2.2)$$

$$R_1 < R_3, \quad (2.2.3)$$

зміна сумарного  $R$  буде здебільшого залежати саме від зміни  $R_1$ , ніж від зміни  $R_2$  та  $R_3$ . І це є справедливим для всіх зондів

Цей вираз пояснює «стійкість» виміру  $R$ , оскільки в цьому випадку, по-перше, для використовуваних типів розчинів замість співвідношень (2.2.2), (2.2.3) будуть справедливі співвідношення:

$$R_1 \ll R_2, \quad (2.2.5)$$

$$R_1 \ll R_3. \quad (2.2.6)$$

Відповідно, у виразі (2.2.4) величиною  $R_1$  можна знехтувати. Крім того, на рис. 2.13, 2.14 зображені еквівалентні схеми нескінченно потужного пласта, якщо ж розглянути випадок, коли пласт, навпроти якого знаходиться зонд (електрод А), має кінцеву потужність, для БКЗ тільки ускладнює завдання, то для БК-3, в силу принципу фокусування, практично ніяк не впливає (в діапазоні можливих змін ПО пластів теригенного розрізу).

Підсумовуючи, треба відмітити (Егурнова, 1996), що на сьогодні в Україні широко використовують тільки два типи ЕК і використовують їх практично завжди одночасно, і це є БК-3 та БКЗ.

Ця «зв'язка» (загальноприйнятий термін, що означає використання різних типів апаратури за одну операцію спуско-підйому) вирішує задачу дослідження повздовжньої провідності пласта.

# ІНДУКЦІЙНИЙ КАРОТАЖ

### 3.1. Фізичні аспекти індукційного каротажу

Індукційний каротаж виник головним чином завдяки необхідності задовольнити двом вимогам:

- максимально зменшити вплив свердловини на дослідження породи;
- отримати можливість досліджувати пласти, розкриті свердловиною, що заповнена непровідним буровим розчином.

Очевидно, що у випадку заповнення свердловини непровідним буровим розчином (на прісній воді або на нафтовій основі) усі розглянуті вище методи ЕК є або малоефективними, або взагалі не можуть бути застосовані для дослідження.

Зазначимо, що є два принципово різних методи ІК: низькочастотний (20-250 кГц – інформація про провідність середовища міститься в амплітуді сигналу) та високочастотний (1-15 МГц – інформація про провідність середовища міститься у фазі сигналу).

Тут і далі ми будемо розглядати тільки низькочастотний ІК.

Індукційні методи принципово відрізняються від усіх методів стаціонарного і квазістаціонарного електричного поля насамперед тим, що для утворення вторинного електромагнітного поля в гірських породах не потрібно забезпечувати безпосередній (гальванічний) контакт зондової установки з навколишнім середовищем.

Ідея ІК полягала у вимірюванні ЕРС, що наводиться в приймальній котушці (вторинним) магнітним полем, індукованим струмами в середовищі, які в свою чергу індуковані первинним полем, яке індуковано змінним струмом заданої амплітуди та частоти, що протікає в генераторній котушці. Ця складна на словах послідовність просто і наочно може бути представлена графічно (рис. 3.1).

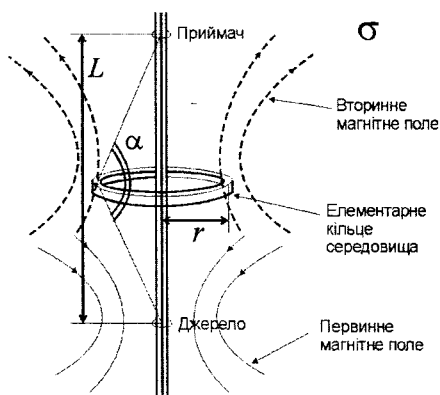


Рис. 3.1. Принцип індукційного каротажу

При цьому відразу привертає увагу один з основних недоліків такого методу: сигнал в приймальному контурі буде сумою двох сигналів: прямого (первинне поле), котрий не залежить від провідності навколишнього середовища і залежить тільки від величини і частоти струму в генераторній котушці і відстані до неї, і набагато меншого за величиною (вторинне поле), але який залежить від провідності навколишнього середовища.

Але такий метод має і декілька незаперечних переваг.

По-перше, він не вимагає заповнення свердловини провідним буровим розчином.

По-друге, сигнал в приймальному контурі  $\varepsilon_{II}$ , при відсутності взаємодії струмів в середовищі, є пропорційним сумі величин провідності різних ділянок вісесиметричного середовища (в ЦСК  $(r, z, \varphi)$ ):

$$\varepsilon_{II} \sim \bar{\sigma}(z) = \int_{-\infty}^{+\infty} \int_0^{+\infty} \sigma(r, z') g(r, z - z') dr dz', \quad (3.1.1)$$

де  $g$  – функція величини вкладу ділянки  $dr dz$  середовища провідності  $\sigma(r, z)$ , названа геометричним фактором (наявність аксіальної симетрії передбачає інтегрування по куту при розрахунку  $g$ ). Величина  $\bar{\sigma}$ , що має розмірність питомої електричної провідності (См/м чи використовувана на практиці – мСм/м), була названа за аналогією з ЕК уявною провідністю (УП). Геометричний фактор прийнято нормувати таким чином, щоб його інтегральне значення для нескінченного середовища дорівнювало одиниці.

Величина  $g$  елементарного кільця зонда, що складається з двох котушок (відстань між якими  $L$ ), абсолютні величини взаємних моментів (кількість витків в обмотці котушки) яких рівні між собою і дорівнюють одиниці, дуже просто розраховується (Кауфман, 1965):

$$g = \frac{L}{2} \frac{r^3}{\left[ r^2 + \left( \frac{L}{2} + z \right)^2 \right]^{\frac{3}{2}} \left[ r^2 + \left( \frac{L}{2} - z \right)^2 \right]^{\frac{3}{2}}}. \quad (3.1.2)$$

(позначення див. рис. 3.1,  $z$  – вертикальна координата елементарного кільця, якщо центр координат знаходиться рівно посередині між приймачем і джерелом).

Легко показати, що геометричний фактор залежить від кута, під яким видно обидві котушки зонда з точки положення елементарного кільця і вираз для якого можна записати як:

$$g = \frac{\sin^3 \alpha}{2L^2}.$$

При розрахунку геометричного фактора зондів, що складаються з більшої кількості котушок – треба сумувати геометричні фактори для всіх пар генераторних та приймальних котушок, враховуючи при цьому кількість витків в їх обмотках.

Розрахований таким чином геометричний фактор  $g'$  необхідно помножити на нормувочний коефіцієнт, так щоби  $g$ , яка входить до (3.1.1), задовольняла умові нормування:

$$\int g(r, z) dr dz = \gamma \int g'(r, z) dr dz = 1. \quad (3.1.3)$$

Формула (3.1.1) є наслідком так званої наближеної (лінійної) теорії Доля (Доля, 1957), яким для спрощення задачі, окрім заміни котушок точковими диполями, були прийняті наступні наближення:

- всі індуковані у провідному середовищі кругові струми мають однакову фазу, зсунуту відносно фази струму в генераторній котушці на  $90^\circ$ ;
- амплітуда густини струму в будь-якій точці розраховується за спрощеною формулою та визначається тільки геометричним фактором та ПП середовища в цій точці.

Ці припущення допомогли Долю побудувати наочну і просту теорію ІК, головне місце в якій посідають геометричні фактори елементарних кілець співвісних із свердловиною одиничних пластів і тонких циліндричних шарів.



Однак ця теорія є наближеною, хоча б тому, що вона не враховує взаємодії струмів в середовищі і реальних просторових розмірів елементів зондів.

Для точного розв'язання прямої задачі КК існує і реалізовано багато числових методів, в тому числі запропонований і реалізований автором (Миронцов, 2004, 2007b, 2009c) метод, який фактично побудований на представленні середовища також як об'єднання елементарних кілець, але при двох доповненнях:

– контури котушок ми розглядаємо як елементарні кільця з врахуванням їх геометричних (діаметр, переріз тощо) та фізичних (провідність) характеристик;

– враховуємо взаємодію струмів як взаємну індукцію всіх елементарних кілець системи.

У загальному виді зміна струму в  $k$ -й генераторній котушці:  
 $I = I_{\text{Re}}^k e^{i\omega t} + iI_{\text{Im}}^k e^{i\omega t}$ , (де  $I_{\text{Re}}^k$ ,  $I_{\text{Im}}^k$  – активна та реактивна складові)  
 забезпечується прикладеною до неї ЕРС:

$$\varepsilon = \varepsilon_{\text{Re}}^k e^{i\omega t} + i\varepsilon_{\text{Im}}^k e^{i\omega t},$$

де

$$\varepsilon_{\text{Re}}^k = A^k = \text{const}, \quad (3.1.4)$$

$$\varepsilon_{\text{Im}}^k = B^k = \text{const}. \quad (3.1.5)$$

Скористаємося принципом взаємної індукції: при зміні струму  $I^j$  в елементарному кільці  $j$  в елементарному кільці  $i$  виникає ЕРС  $\varepsilon^{ij}$ :

$$\varepsilon^{ij} = -M_{ij} \frac{dI^j}{dt},$$

де  $M_{ij}$  – коефіцієнт взаємної індукції.

Повна ЕРС  $\varepsilon^i$ , що виникає в  $i$ -му елементарному кільці, буде сумою ЕРС, індукованих окремими струмами в інших кільцях:

$$\varepsilon^i = \sum_j \varepsilon^{ij} = -\sum_j M_{ij} \frac{dI^j}{dt}.$$

Для того, щоб отримати остаточну систему рівнянь, скористаємося:

1. Законом Ома в інтегральній формі:

$$\varepsilon^i = I^i R_i,$$

де  $R_i$  – опір елементарного кільця. В силу аксіальної симетрії:  $R_i = \oint_{C_i} \langle \rho \rangle \frac{dl_i}{dS_i}$

( $\langle \rho \rangle$  – усереднений ПО за перерізом  $dS_i$  елементарного кільця);

2. Формулою для похідної за часом змінного струму постійної частоти:

$$\frac{dI^i}{dt} = i\omega I_{\text{Re}}^i e^{i\omega t} - i\omega I_{\text{Im}}^i e^{i\omega t};$$

3. Тим що:

$$M_{ij} = M_{ji}.$$

У підсумку отримаємо:

$$I_{\text{Re}}^i R_i - \omega \sum_j M_{ij} I_{\text{Im}}^j = 0, \quad (3.1.6)$$

$$I_{\text{Im}}^i R_i + \omega \sum_j M_{ij} I_{\text{Re}}^j = 0. \quad (3.1.7)$$

Додавши до правих частин цих рівнянь, які відповідають зміні активної та реактивної складової ЕРС генераторних котушок значення  $A^k$  або  $B^k$ , відповідно праві частини рівнянь (3.1.4), (3.1.5), отримаємо неоднорідну та не вироджену СЛАР, в якій кількість невідомих  $N$  дорівнює кількості рівнянь.

Такий метод виявився зручним для дослідження тих особливостей задач ІК, які не можна дослідити в наближеній теорії Доля. Але він виявився доволі громіздким для використання при розв'язанні обернених задач в

режимі реального часу, коли час розв'язання відіграє вирішальну роль, а саме такі задачі, як правило, виникають на виробництві.

На практиці використовують дещо спрощений підхід. Він полягає у можливості точно оцінити вплив взаємодії струмів у однорідному нескінченному середовищі (так званий «скін-ефект»), якщо вважати котушки точковими, а потім величину цього впливу перенести на неоднорідне середовище, вважаючи, що воно однорідне, з деякою усередненою ПП. В якості цієї «деякої усередненої ПП» обирають вимірючу УП.

Для того щоби отримати значення величини скін-ефекту, використовують розв'язання рівнянь Максвелла (Кауфман, 1965), за допомогою яких, для випадку однієї генераторної котушки (точкового диполю) в точці спостереження на відстані  $L$  на осі свердловини, можна отримати значення активної та реактивної складових ЕРС відповідно:

$$\varepsilon_{\text{Re}} = i\varepsilon_0 e^{-p} [(1+p)\sin p - p \cos p], \quad (3.1.8)$$

$$\varepsilon_{\text{Im}} = \varepsilon_0 e^{-p} [(1+p)\cos p + p \sin p], \quad (3.1.9)$$

де  $p = L\sqrt{\frac{\sigma\mu\omega}{2}}$ ,  $\varepsilon_0 = i\frac{\omega\mu M}{2\pi L^3}$ ,  $M$  – момент диполя генераторної котушки,  $\omega$  – частота збудження,  $\mu$  – магнітна проникливість.

Для багатокотушкових зондів потрібно просумувати всі ЕРС, що наводяться генераторними котушками в приймальному контурі.

### 3.2. Відмінність індукційного від електричного каротажу

Мета і ЕК, і ІК – дослідження геоелектричних параметрів розкритих свердловиною пластів. Але, як уже було відзначено, величина, яка вимірюється при ЕК, пропорційна опорі, а величина, яка вимірюється при ІК, – провідності, тобто обернено пропорційна опорі.

Крім того, при ІК струмові лінії знаходяться в площинах, паралельних границям поділу між пластами, тому ІК є чутливим до тонких пластів з підвищеною ПП і майже не відмічає тонких пластів підвищеного ПО.

ЕК, навпаки, чутливий до тонких пластів високого ПО.

Для ілюстрації цього твердження розглянемо не диференційну, а інтегральну форму закону Ома. У цьому випадку сумарний опір провідника, представлено на рис. 3.2.а, дорівнюватиме:

$$R = 2R_0 + R_1.$$

І при  $R_0 \ll R_1$ :

$$R \cong R_1.$$

У той же час, провідність того ж провідника буде:

$$\Omega = \frac{1}{R} = \frac{2R_0 + R_1}{2R_0R_1}.$$

І при:

$$R_0 \ll R_1 \quad (3.2.1)$$

можемо отримати:

$$R \cong R_0. \quad (3.2.2)$$

Що при виконанні (3.2.1) означає:

$$\Omega \cong \frac{1}{R_0} \cong \Omega_0.$$

Така чутливість ЕК і ІК каротажу до неоднорідностей різної величини опору виявляється суттєвою при інтерпретації їх даних.

Більш того, якщо ми розглядаємо паралельний опір провідників (рис. 3.3.6), то при виконанні умови (3.2.1) для сумарного опору  $R$  ми також отримуємо вираз (3.2.2).

Крім того, провідність  $\sigma$ , взагалі кажучи, в кожній точці простору не можна описати одним параметром, а лише кількома. Іншими словами,  $\sigma$  є не скалярною, а тензорною величиною. Тобто у рівнянні, що зв'язує вектор щільності струму  $\vec{j}$  з вектором напруженості електричного поля  $\vec{E}$ :

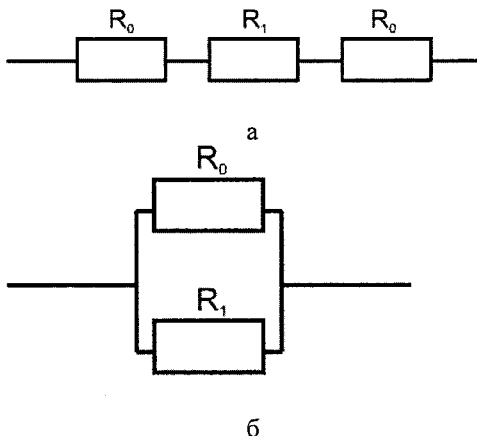


Рис. 3.2. Спрощена електрична схема моделі середовища при каротажі

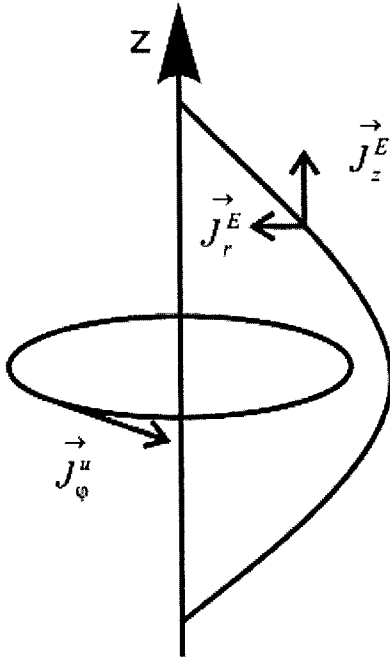


Рис. 3.3. Спрямованість дослідження при ЕК та ІК

$$\vec{j} = \sigma \vec{E},$$

нам необхідно замість скалярної величини використовувати тензор:

$$\sigma = \begin{vmatrix} \sigma_{rr} & 0 & 0 \\ 0 & \sigma_{zz} & 0 \\ 0 & 0 & \sigma_{\varphi\varphi} \end{vmatrix}.$$

Це важливо, оскільки геометрія ЕК і ІК побудована таким чином, що на вимір впливають саме різні компоненти цього тензора (див. рис. 3.3).

У випадку, якщо  $\sigma_{rr} = \sigma_{zz} = \sigma_E = \rho_E^{-1}$  (в ЦСК), ми можемо говорити про виконання диференціальної форми закону Ома для ЕК (індекс  $E$  показує, що мова йде про ЕК):

$$\vec{j} = \sigma_E \vec{E}.$$

А у разі ІК ( $\sigma_{\varphi\varphi} = \sigma_I = \rho_I^{-1}$ ) ми можемо говорити про виконання диференціальної форми закону Ома:

$$\vec{j} = \sigma_I \vec{E},$$

(індекс  $I$  показує, що мова йде про ІК). Взагалі кажучи, з огляду на особливості осадконакопичення, прийнято вважати, що  $\sigma_{\varphi\varphi} = \sigma_{rr}$ .

До речі, перераховані особливості дають змогу стверджувати, що ЕК і ІК будуть по-різному чутливі до анізотропії провідності досліджуваної породи.

Питання впливу анізотропії виникло при експериментальному виявленні особливості виміру: провідність нашарування залежить від напрямку вимірювання. Подібні результати почали фіксуватися ще в 1950-х

### 3.4.а. Вертикальна свердловина

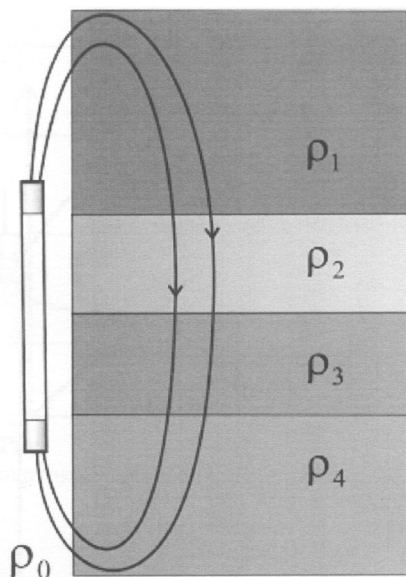
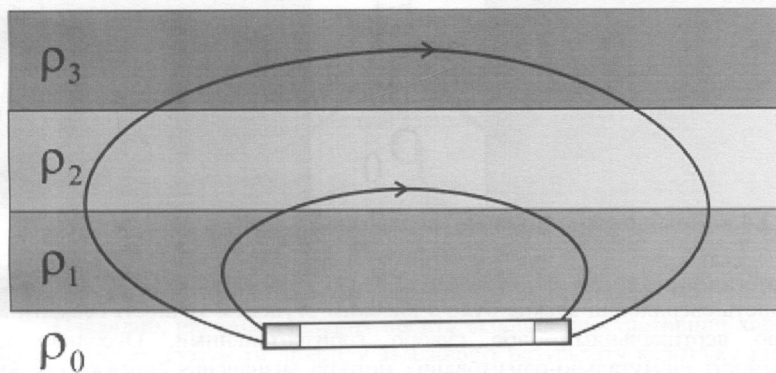
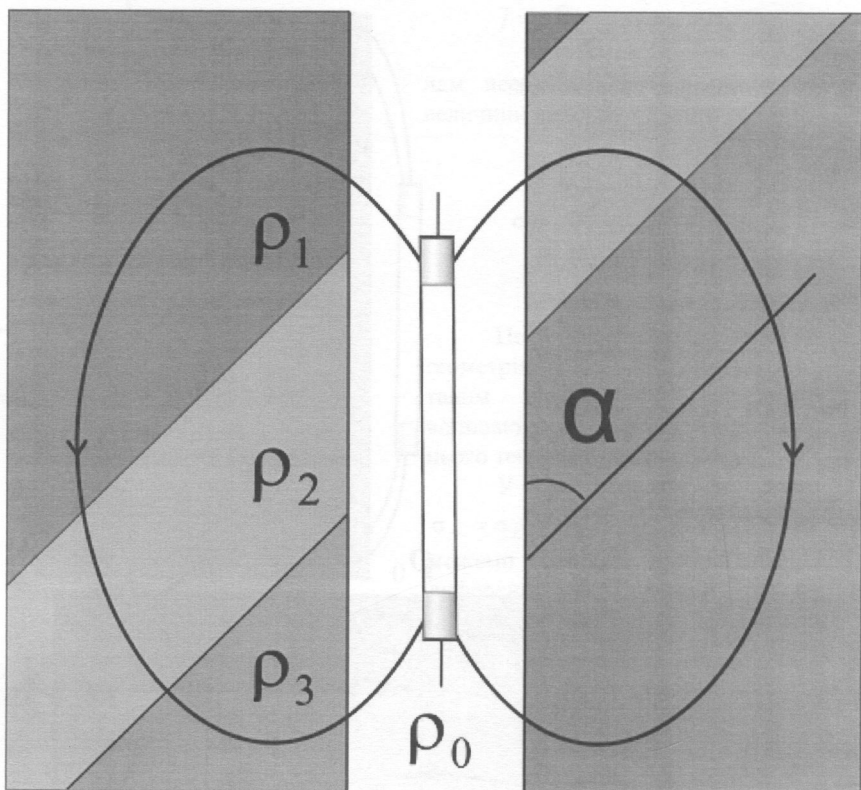


Рис. 3.4.б. Горизонтальна свердловина



роках, і їх важлива роль проявилася повною мірою при необхідності проводити каротаж не тільки у вертикальних (рис. 3.4.а), але і в горизонтальних (рис. 3.4.б), а також в похило-горизонтальних свердловинах (рис. 3.5.в).

При цьому необхідно розуміти, що поняття вертикальна і горизонтальна свердловина досить умовні. Навіть вважаючи, що границі нашарування – паралельні площині – всі свердловини можна розглядати похило-горизонтальними. Така умовна класифікація була введена швидше



**Рис. 3.4.в.** Похило-горизонтальна свердловина

для зручності, так як на практиці ХХ ст. і до початку ХХІ ст. дійсно більшість свердловин можна було з високим ступенем точності вважати або суворо вертикальними, або суворо горизонтальними. Особливо при відсутності азимутально-орієнтованих методів визначення справжнього кута нашарування (нахилометрії наприклад).

У випадку похило-горизонтальних свердловин (рис. 3.4.в) уявлення, засноване на послідовному і паралельному з'єднанні опорів, втрачає свою наочність, так як в цьому випадку зв'язок буде трохи складнішим.

Чергування прошарків різного ПО називають трансляційною анізотропією. Але анізотропія також зустрічається і в більш дрібному масштабі. А саме, коли сам пласт складається з найдрібніших частинок, провідність яких залежить від напрямку вимірювання. Таку анізотропію за

прийнятою традицією називають мікроанізотропією, на відміну від трансляційної анізотропії нашарування, яку називають макроанізотропією.

Мікроанізотропія – поширене явище в глинах, сланцях, пісках і карбонатних покладах взагалі.

Для опису мікроанізотропії ще братами Шлюмберже було введено поняття горизонтального опору  $R_{\Gamma}$  і вертикального опору  $R_B$ :

$$\frac{1}{R_{\Gamma}} = \frac{P_1}{R_1} + \frac{P_2}{R_2},$$

$$R_B = R_1 P_1 + P_2 R_2,$$

де  $P_1$ ,  $P_2$  – об'ємні частки (у %) речовин з опором  $R_1$  і  $R_2$  відповідно.

Виявилось, що ці величини пов'язані з УО  $R_K$ :

$$R_K = \frac{R}{\sqrt{\sin^2 \alpha + \lambda^2 \cos^2 \alpha}},$$

де  $\alpha$  – кут між вертикальною віссю координат і віссю виміру УО (рис. 3.5).

Очевидно, що таке уявлення носить скоріше ілюстративний характер, проте дозволяє зрозуміти природу залежності результату каротажу від кута нашарування і деяких інших особливостей анізотропії провідності.

За допомогою цих величин були введені також коефіцієнт анізотропії:

$$\lambda = \sqrt{R_B / R_{\Gamma}},$$

і середній (геометричний) опір:

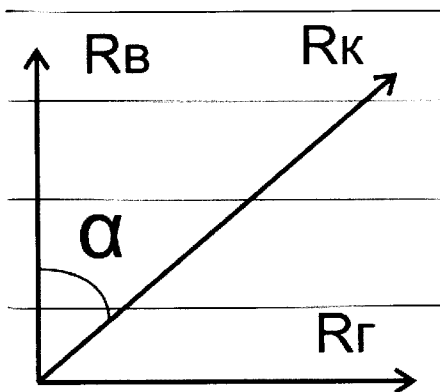


Рис. 3.5. Зв'язок горизонтального і вертикального опорів з уявним опором



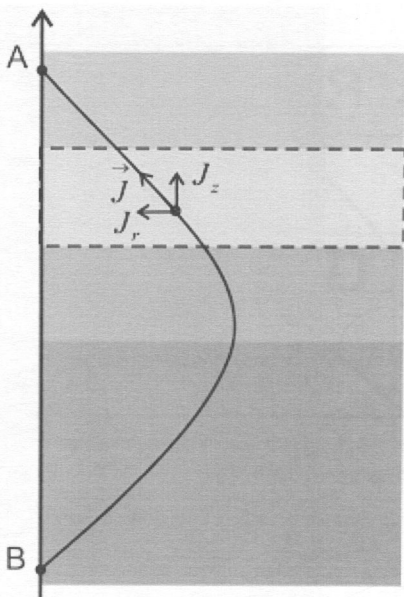


Рис. 3.6. Вплив скінченної відстані до оберненого електрода на чутливість зондів ЕК до анізотропії провідності

свердловини.

З початком широкого промислового застосування каротажу і аж до 1980-х років впливом анізотропії нехтували, так як вважали його ефектом другого порядку. Однак коли з'явилась гостра необхідність досліджувати похилі нашарування і горизонтальні свердловини, виявилось, що такий ефект може бути істотно вище, навіть ніж ефект вміщуючих порід.

Для врахування такого впливу довелося розвивати напрямок моделювання тривимірного каротажу. При цьому інтерпретація зводилася до введення поправки за кут нашарування, при відомій його величині, по задалегідь розрахованих таблицях або палетках.

Також з'ясувалося, що результати ІК в розвідувальних вертикальних і експлуатаційних горизонтальних свердловинах значно відрізняються в одних і тих же пластах. Після ретельного аналізу матеріалів було вперше встановлено, що така розбіжність викликана саме явищем мікроанізотропії (Leake, Shray, 1991).

$$R = \sqrt{R_B R_T} .$$

При  $\alpha = 0$  очевидно  $R_K = R_B$ . Ця особливість одержала назву парадокс анізотропії. Вона особливо явно проявляється при порівнянні даних ЕК потенціал-зондом і ІК. Виявилось, що потенціал-зонд в деяких глинах і сланцях показує більше значення УО. Це наштовхнуло на питання про вплив свердловини в анізотропному середовищі.

Було теоретично показано, що  $R_B$  спотворює показання ЕК у вертикальній свердловині, заповненій провідним буровим розчином, якщо пласт є анізотропним. Пізніше було теоретично досліджено питання впливу кута нашарування (рис. 3.4.в) на показання як ЕК, так і ІК, але без впливу

Зміна в моделі вертикальної на горизонтальну свердловину відповідає заміні місцями  $R_{Г}$  і  $R_{В}$  (рис. 3.5). Саме тому постає завдання створення апаратури каротажу, чутливого до  $R_{В}$  у вертикальних свердловинах.

Ідея використовувати для цього зонд ІК з котушками, орієнтованими по нормалі до осі свердловини, наштовхнулася спершу на проблему значного впливу свердловини на такий каротаж (сигнал від свердловини перевищує корисний сигнал).

Загальні міркування наштовхують на думку, що класичні зонди з точковими електродами повинні бути чутливими до  $R_{В}$  при наближенні оберненого електрода (рис. 3.6). Також чутливим до  $R_{В}$  повинен бути і зонд БК при наближенні оберненого електрода.

### 3.3. Апаратура індукційного каротажу

Так само, як і різна апаратура ЕК вирішує різні задачі, так і апаратуру ІК можна умовно поділити за принципом: для дослідження зони пласта, неушкодженої фільтратом бурового розчину високої вертикальної роздільної здатності, і зондуюча апаратура ІК, що дозволяє досліджувати зміну провідності вздовж пласта.

У принципі найпростіший індукційний каротажний зонд теоретично може складатись з двох котушок: генераторної (джерело) та приймальної (приймач). Але такий зонд не може ефективно використовуватись на практиці, оскільки (як вже зазначалося в п.3.1) сигнал, що реєструється в приймальній котушці, містить дві складові, при цьому корисна інформація знаходиться в сигналі, який може бути на порядки меншим, ніж так званий «прямий». Отже, найпростіший зонд, який може бути

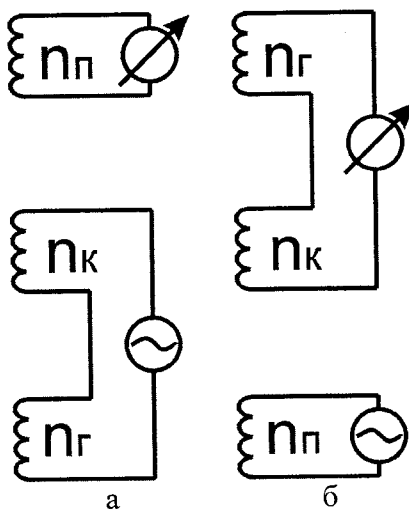
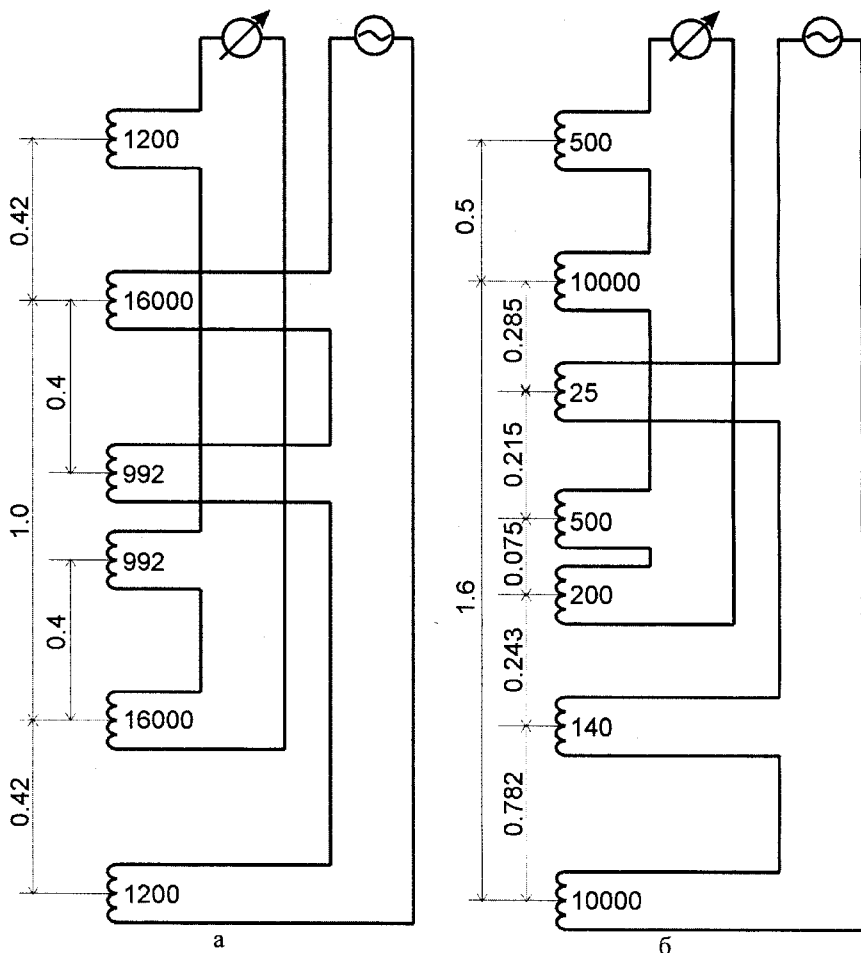


Рис. 3.7. Схеми трьохкотушкових зондів:

*а* – компенсаційна котушка в генераторному колі;  
*б* – компенсаційна котушка у вимірювальному колі



**Рис. 3.8.** Схеми зондів ІК (цифри поряд з котушками – їх відносні моменти):  
*а* – 6Φ1 (апаратура ІК-2), *б* – 7Φ1,6 (апаратура АІК-5)

практично використаний, – трьохкотушковий (рис. 3.7.а). Момент його компенсаційної котушки підібрано таким чином, щоби пряме поле у вимірювальному контурі дорівнювало нулю у повітрі.

Зазначимо, що якщо залишити незмінними взаємні відстані між котушками і їх моменти, то взаємна заміна генераторного контуру на вимірювальний не змінить каротажних характеристик зонда (рис. 3.7).

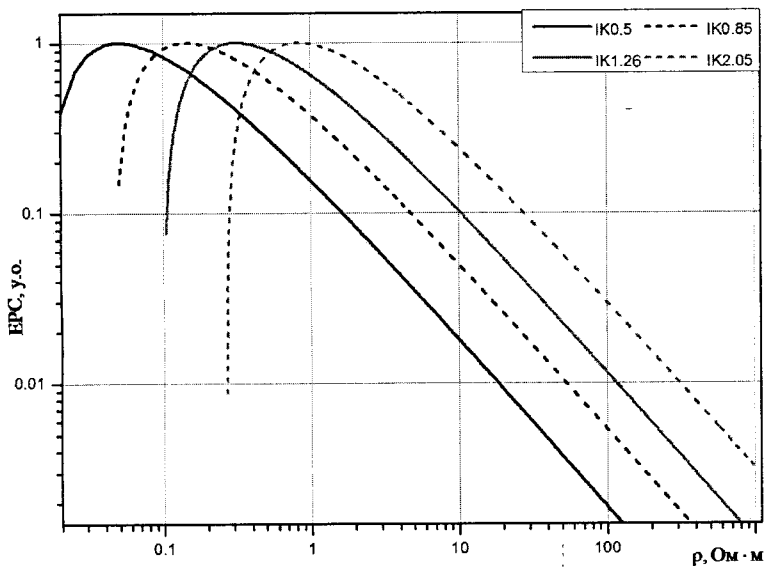


Рис. 3.9. Робочий діапазон 4К (активні складові сигналу)

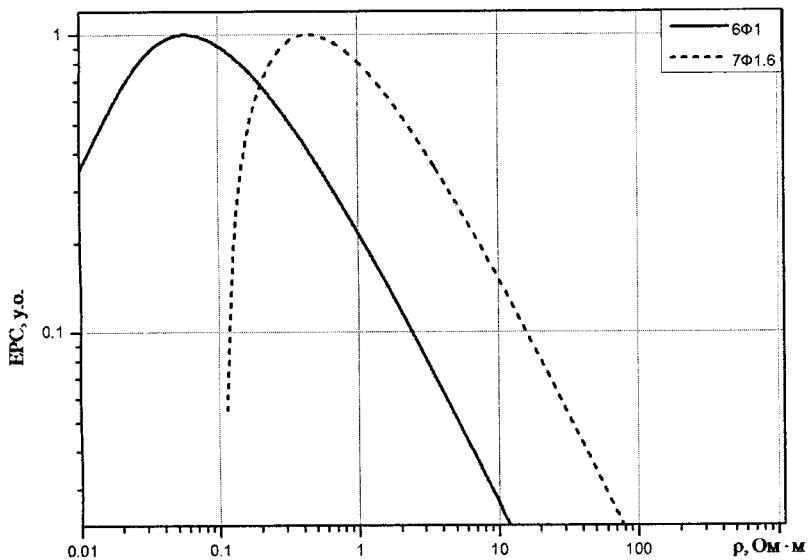


Рис. 3.10. Робочий діапазон 6Ф1, 7Ф1.6 (активні складові сигналу)

Складніші зонди, що використовуються в Україні, мають більше котушок (див. рис. 3.8).

Розглядаючи трьохкатушкові зонди, для визначеності будемо вважати, що компенсаційна котушка включена до генераторного кола і відповідно сигнал такого зонда буде дорівнювати різниці сигналів від генераторної і компенсаційної котушок.

Саме з таких чотирьох зондів складається апаратура 4ІК (Миронцов, 2012d; Миронцов 2018a; Myrontsov 2018).

Зондуючу апаратуру 4ІК в чомусь можна розглядати як аналог БКЗ у ІК (так само, як зонди 6Ф1 та 7Ф1.6 як аналог БК-3) за одним невеличким винятком – вертикальна роздільна здатність найбільшого зонда цієї апаратури краща, ніж у великих зондів БКЗ, також 4ІК позбавлений недоліку екранування свердловиною, а глибина його дослідження достатня для самостійного визначення області пласта, неушкодженої фільтратом бурового розчину.

Проте є інша принципова відмінність між БКЗ і 4ІК: апаратура 4ІК дуже складна у виготовленні, на відміну від БКЗ. Однак, задача її виготовлення була успішно виконана вітчизняними приладобудівними компаніями останніми десятиріччями, і саме на прикладі цієї апаратури ми будемо розглядати розв'язання оберненої задачі багатозондового ІК.

В однозондовій апаратурі ІК котушки (кількість, взаємне розташування та значення їх моментів) підбираються таким чином, щоби максимально зменшити вплив свердловини, зони проникнення та вміщуючих пластів на результати вимірів.

Отже, окрім генераторної, приймальної та компенсаційних, такі зонди комплектуються додатковими фокусуючими котушками, що можуть вмикатися як в генераторний, так і у вимірювальний контури. При цьому якщо потрібно, щоби взаємні моменти котушок були різних знаків – їх обмотки намотують назустріч одна одній.

На рис. 3.8. показано взаємне розташування котушок та відносні величини модулів їх моментів (без врахування напрямку обмотки) двох найбільш вживаних сьогодні зондів ІК в Україні та на теренах країн близького зарубіжжя – 6Ф1 та 7Ф1.6.

Як вже було зазначено, реальна взаємодія струмів в середовищі впливає на характеристики зондів. Насамперед це призводить до принципового обмеження робочого діапазону зонда в області малих значень ПО.

Для обчислення такого обмеження використовують суму значень всіх ЕРС ((3.1.8) – для дослідження діапазону виміру активної складової сигналу, (3.1.9) – реактивної складової сигналу) у приймальному контурі і будують їх залежність від параметра ПО (чи ПП).

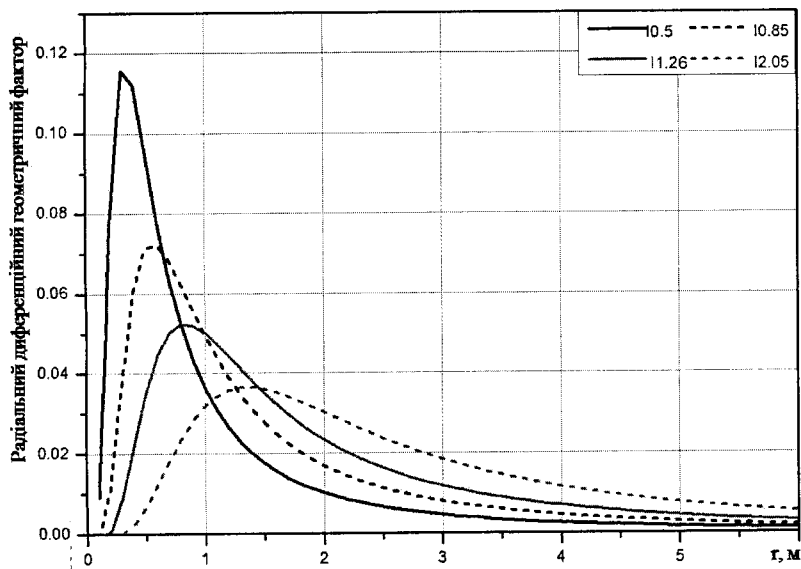


Рис. 3.11. Диференціальний радіальний геометричний фактор 4К

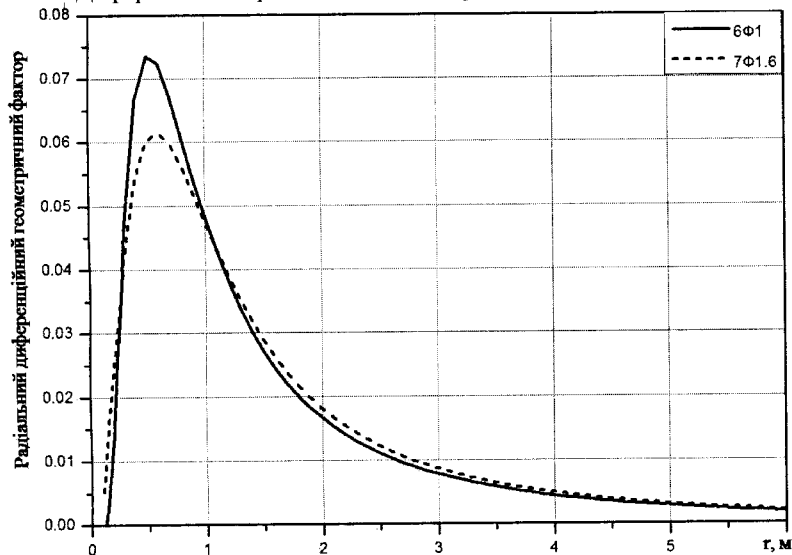


Рис. 3.12. Диференціальний радіальний геометричний фактор 6Ф1, 7Ф1.6

На рис. 3.9, 3.10 побудовано графіки залежності нормованої активної складової сигналу у приймальному контурі для зондів комплексу 4ІК (частота 100 кГц) та зондів 6Ф1 (частота 50 кГц), 7Ф1.6 (частота 160 кГц).

Дійсно, кожна крива обмежена зліва екстремумом, що і є нижньою границею діапазону виміру ПО. Верхня границя визначається чутливістю і можливістю реєстрації корисного сигналу в приймальному контурі на фоні шуму.

Слід зазначити, що при зменшенні робочої частоти кожного із зондів його відповідний діапазон зміститься вліво на величину, пропорційну величині зменшення частоти.

Саме представлені залежності використовують на практиці для введення правки «за скін-ефект». Перераховуючи значення ЕРС у значення УО, ми за допомогою розрахованої залежності перераховуємо кожне значення УО (вісь ординат) в значення ПО (вісь абсцис) для однорідного нескінченного середовища, але вважаючи, що струми в ньому не взаємодіють.

Для взаємного порівняння вертикальної та горизонтальної роздільної здатності зондів чи оцінки абсолютної величини цієї здатності у високоомному середовищі (взаємодія струмів в якому нехтовно мала) використовують поняття: вертикальний геометричний фактор, диференційний радіальний геометричний фактор та інтегральний радіальний геометричний фактор. Розрахунок відповідних величин відбувається в рамках наближення Доля.

Для розрахунку диференційного радіального фактора використовують поняття геометричного фактора і формулу:

$$G_{DR}(r_0) = \int_{-\infty}^{\infty} \int_{r_0}^{r_0+dr} g(r, z) dr dz .$$

Фактично диференційний радіальний фактор в точці  $r_0$  відображає вагу вкладу тонкого коаксіального шару товщиною  $dr$  у сумарний сигнал.

Для розрахунку інтегрального радіального диференційного фактора використовують формулу:

$$G_{IR}(r_0) = \int_{-\infty}^{\infty} \int_0^{r_0} g(r, z) dr dz .$$

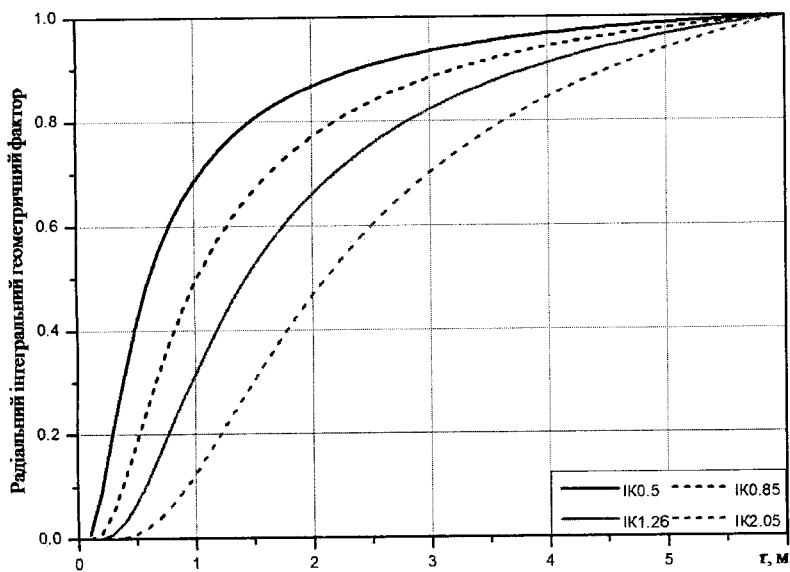


Рис. 3.13. Інтегральний радіальний геометричний фактор 4К

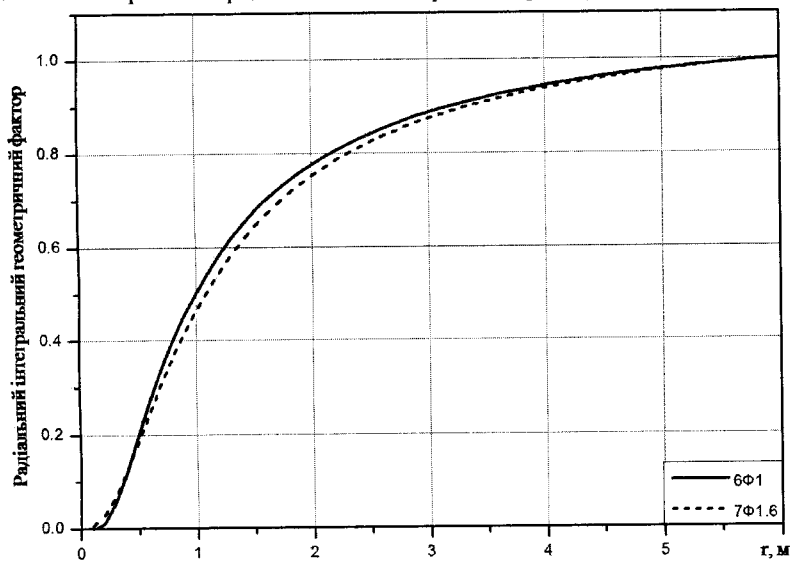


Рис. 3.14. Інтегральний радіальний геометричний фактор 6Φ1, 7Φ1.6



Фактично інтегральний диференційний фактор в точці  $r_0$  відображає вагу вкладу всього простору від осі свердловини до циліндричної границі в цій точці у сумарний сигнал.

Використовуючи поняття інтегрального радіального геометричного фактора, вводять поняття глибинності зонда ІК. А саме під глибинністю розуміють відстань від осі свердловини, на якій інтегральний радіальний геометричний фактор дорівнює 0.5. Тобто це координата циліндричної границі, яка поділяє середовище на дві частини, вклади кожної з яких в однорідному середовищі рівні між собою і дорівнюють кожна половині від усього сигналу.

На рис. 3.11, 3.12 зображено диференційні радіальні геометричні фактори 4ІК, 6Ф1, 7Ф1.6, на рис. 3.13, 3.14 зображено їх інтегральні радіальні геометричні фактори.

З наведених результатів випливає, що 4ІК повинен добре відображати розподіл провідності вздовж пласта для досить широкого діапазону значень радіуса зони проникнення. Хоча при підвищуючому проникненні опір зони буде гірше відчуватись цим комплексом, ніж при знижуючому.

Також з представлених результатів випливає, що зонди 6Ф1, 7Ф1.6 мають глибинність майже однакову із зондом І0.85 комплексу 4ІК, що неодмінно викликає питання: навіщо мати окремий зонд, який має глибину дослідження нижче «середньої» і відповідно точно поступається в питанні дослідження провідності області пласта, неушкодженої фільтратом бурового розчину при великих розмірах зони проникнення?

Відповідь на це питання допомагає отримати дослідження вертикальних характеристик зондів, які обчислюють за формулою:

$$G_V(z_0) = \int_0^{\infty} \int_{z_0}^{z_0+dz} g(r, z) dz dr .$$

На рис. 3.15, 3.16 зображені вертикальні (диференційні) геометричні фактори 4ІК, 6Ф1 та 7Ф1.6.

Перше, що привертає увагу, це несиметричність (відносно дзеркального відображення відносно середини зонда) форми геометричних вертикальних факторів трьохкутшких зондів, симетричність кривої геометричного вертикального фактора 6Ф1 та майже симетрична форма кривої фактора зонду 7Ф1.6.

З цього випливає, що на виміри зондів 6Ф1 та 7Ф1.6 набагато менше впливають сусідні (вміщуючі) пласти і їх криві менше будуть спотворені в околах положень горизонтальних границь пластів.

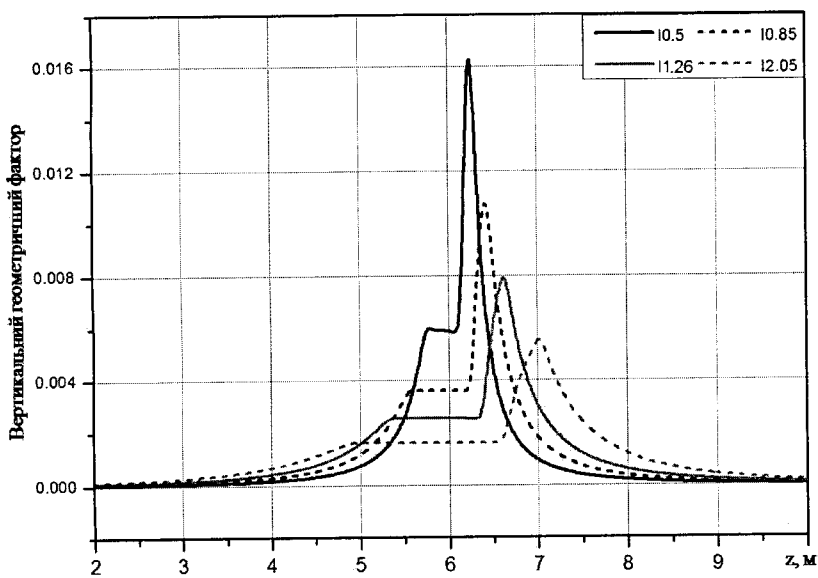


Рис. 3.15. Вертикальный геометрический фактор 4К

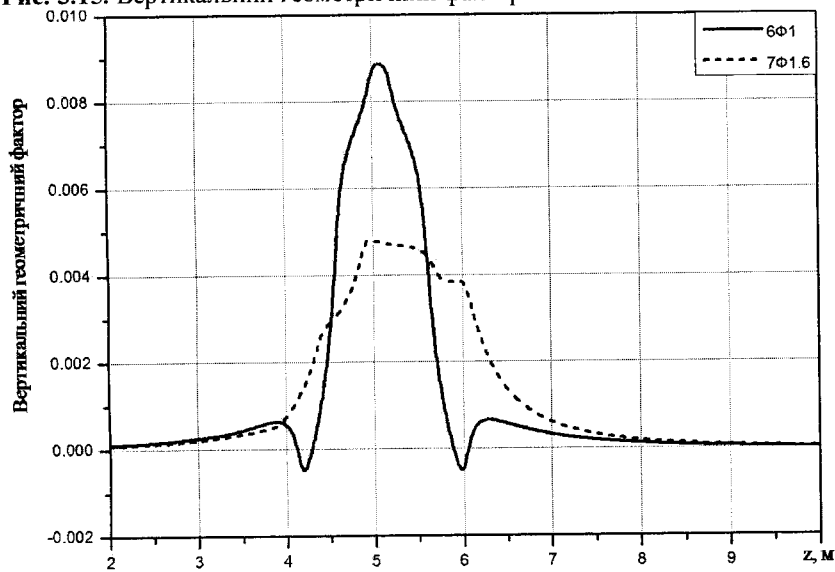


Рис. 3.16. Вертикальный геометрический фактор 6Ф1, 7Ф1.6

Для того щоби продемонструвати це наочно, розглянемо, за аналогією з подібним розглядом для ЕК, чотири простих розрізи: перший, що містить поодинокий пласт без проникнення потужністю 4 м (рис. 3.17); другий, що містить пачку з трьох пластів без проникнення, кожен потужністю 4 м (рис. 3.17); третій, що містить пачку з трьох пластів з підвищуючим проникненням, кожен потужністю 4 м (рис. 3.18); четвертий, що містить пачку з трьох пластів з понижуючим проникненням, кожен потужністю 4 м (рис. 3.8).

Очевидно, що вертикальні характеристики багатокотушкових зондів ІК набагато кращі ніж трьохкотушкових. Тут спостерігається певна аналогія з порівнянням характеристик БКЗ та БК-3.

На практиці, для того щоби мати комплекс, з одного боку, з максимально хорошими характеристиками, а з іншого, не занадто складний (і з точки зору експлуатації і з точки зору подальшої інтерпретації даних його каротажу), в одній зв'язці поєднують зонди ЕК та ІК. При цьому їх підбирають в комплекс таким чином, щоби була можливість і досліджувати радіальний розподіл провідності ближньої та середньовіддаленої зони пласта, і щоби при дослідженні дальньої частини (неушкодженої фільтратом бурового розчину) вплив вмішаних пластів був якомога менший.

Наприклад, прилади DPIL (компанії Atlas Wire line Services), Phasor (Schlumberger) і HRI (Halliburton) містять два зонди ІК середньої та великої глибини дослідження і зонд БК зі сферичним фокусуванням порівняно невеликої глибини дослідження.

У Росії також розроблена комплексна апаратура ІК, БК: КЗ-741 (НПФ «Геофізика»). Вона включає трьохелектродний зонд БК-3, зонд ІК (311) і зонди БКЗ. У комплексі немає фокусованих зондів ближньої зони.

Підприємство «Герс» пропонує збірку, в яку входять фокусований зонд БК-3 ближньої зони і ІК великої глибини дослідження.

За набором зондів і їх характеристиками найбільш близька до апаратури Phasor, HRI, DPIL російська апаратура ЕЗ6М. У неї включені: глибинний зонд ІК-6Е1, зонд середньої глибини 8Е0.9 і зонд БК малого радіусу дослідження.

Зарубіжними компаніями розроблена апаратура фокусованого ЕК DLLT-B (Halliburton), DLL, MSFL (Computalog), ALL (Xi am Petroleum Expl. Ins. Complex), HRLS (Schlumberger). Прилад DLLT-B включає два зонди БК.

Апаратура ALL (багатоеlementний БК з фізичним фокусуванням поля) включає чотири різноглибинні зонди: AL1 0.2 м, AL2 0.36 м, AL3 0.52 м, AL4 1.4 м.

Компанія Schlumberger створила прилад БК високої просторової роздільної здатності HRLA з фізичним фокусуванням поля і можливістю робити п'ять вимірювань різноглибинними зондами.

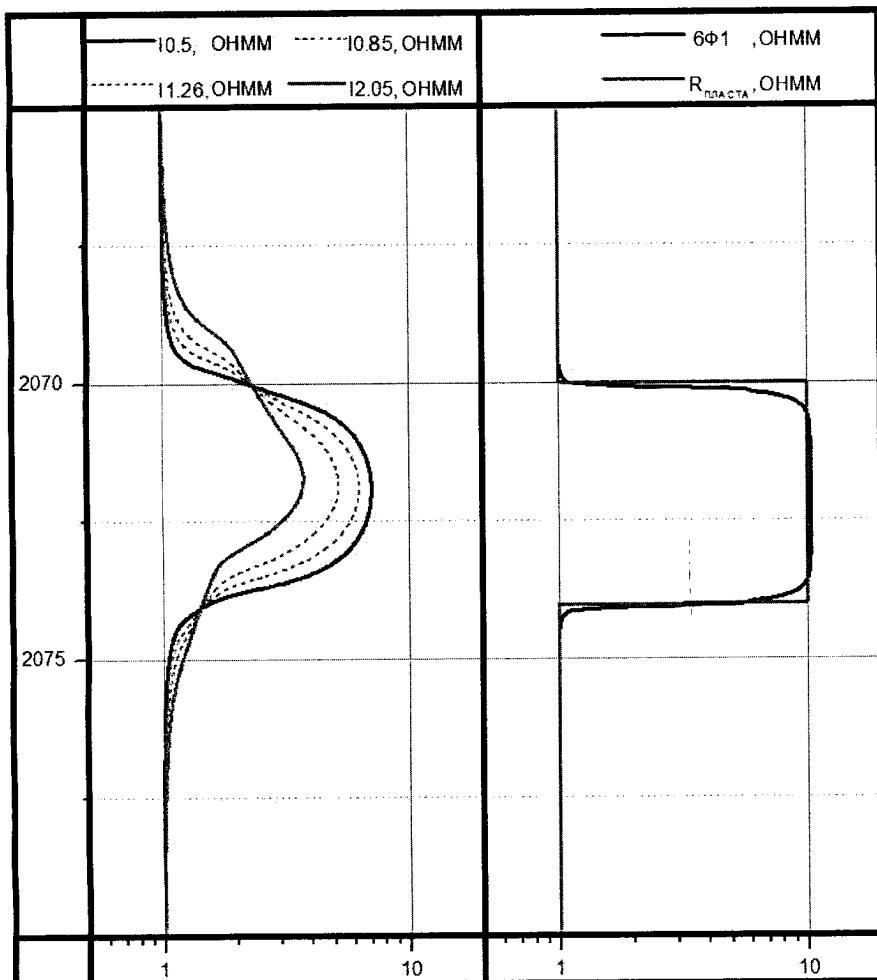


Рис. 3.17. Діаграми 4К та 6Ф1 для поодинокого пласта без зони проникнення, розкритого свердловиною ( $\rho_C = 1 \text{ Ом}\cdot\text{м}$ )

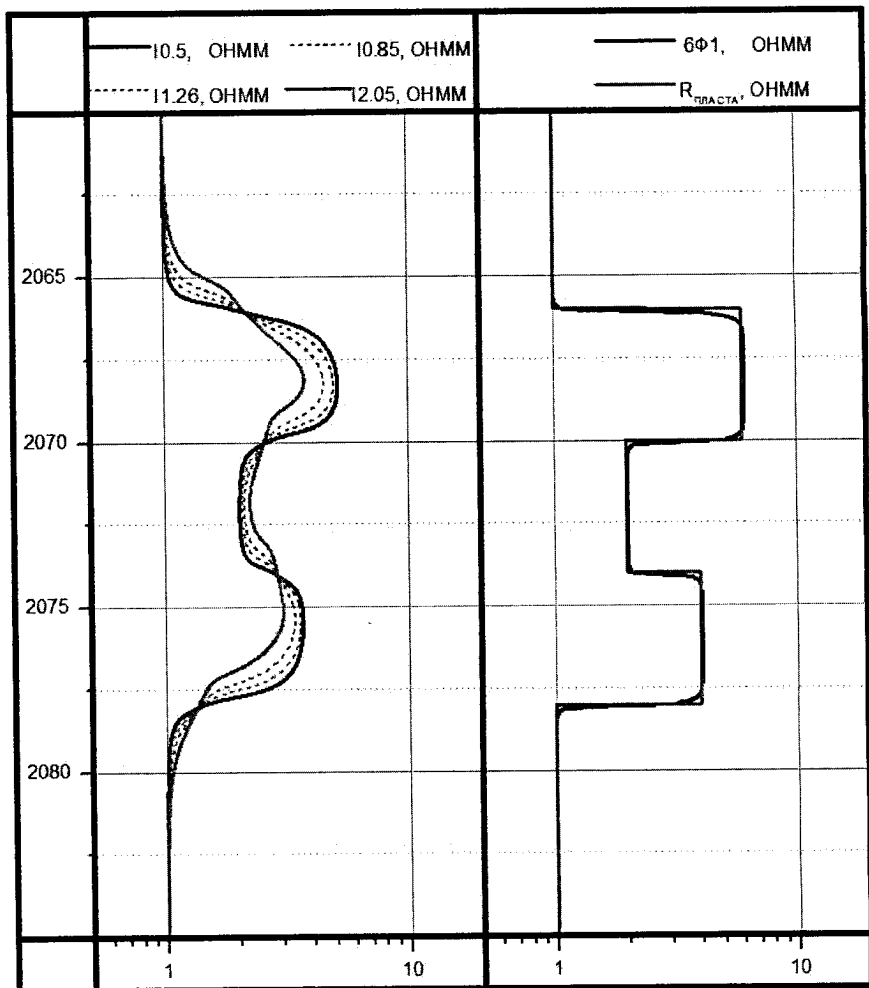


Рис. 3.18. Діаграми 4К та 6Ф1 для пачки трьох пластів без зони проникнення, розкритих свердловиною ( $\rho_c = 1 \text{ Ом}\cdot\text{м}$ )

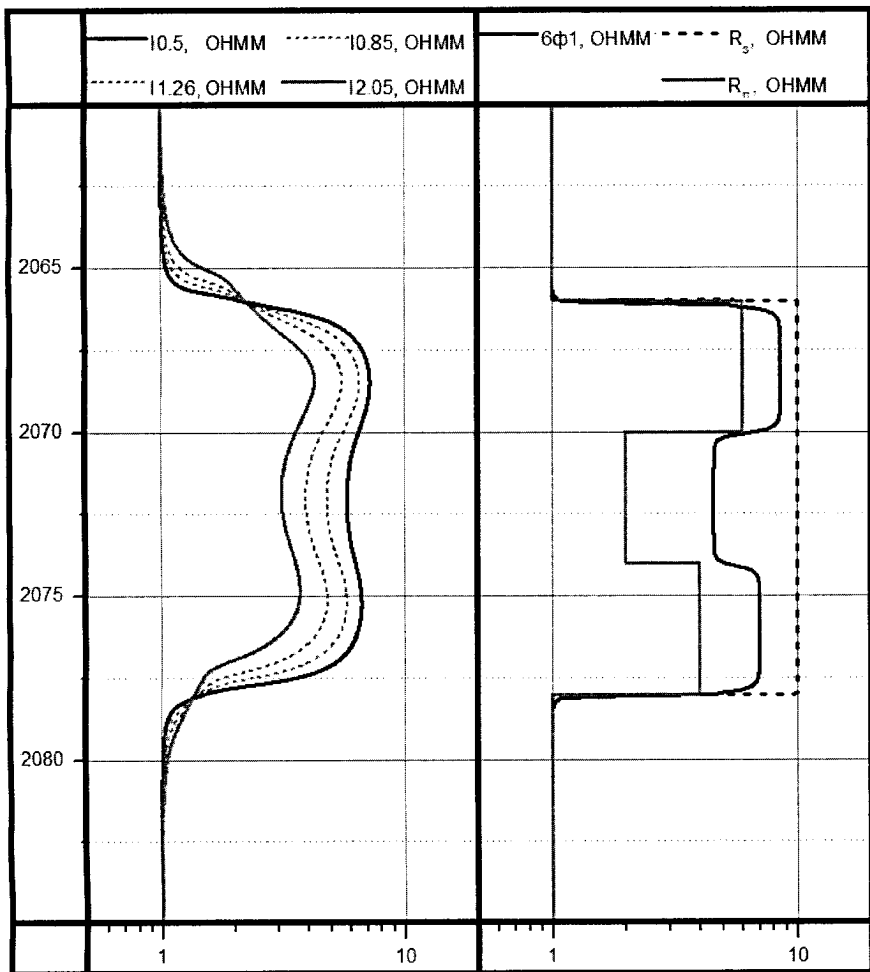


Рис. 3.19. Діаграми 4К та 6Φ1 для пачки трьох пластів, розкритих свердливиною, із зоною проникнення ( $\rho_c = 1 \text{ Ом}\cdot\text{м}$ ,  $D/d = 6$ )

Багатоелементна апаратура HDLL (Baker Atlas) з математичним фокусуванням (синтетичні криві БК) є втіленням ідеї MFRT. Вона містить один струмовий і 18 вимірювальних електродів.

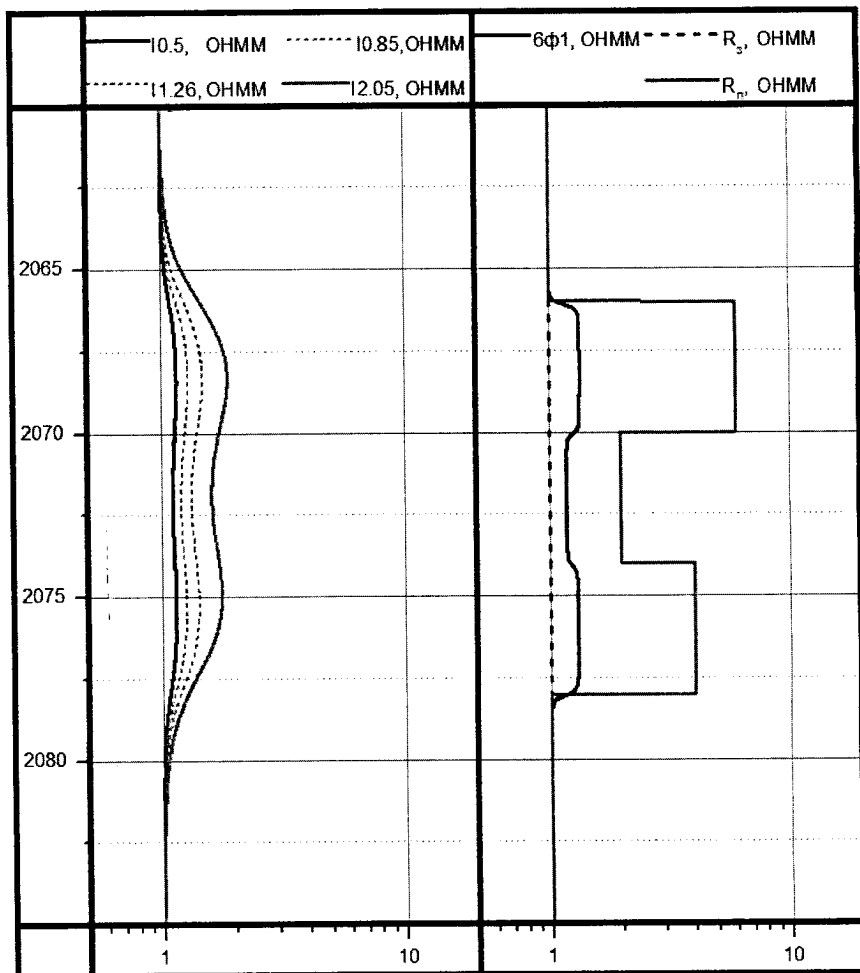


Рис. 3.20. Діаграми 4К та 6Ф1 для пачки трьох пластів, розкритих свердловиною, із зоною проникнення ( $\rho_c = 1 \text{ Ом}\cdot\text{м}$ ,  $D/d = 6$ )

Відомі і широко застосовуються комплекси каротажного зондування: КАСКАД-Е (БКЗ + 2БК, ПС, 5К) випускає ТОВ «Нефтегазгеофизика»; ВІКІЗ – ЗАТ НВП ГА «Луч»; МЕГА (БКЗ-БК-К) – група компаній, що входять в ЗСК «Тюменьпромгеофизика»; серію комплексів «Горизонт» для автономного каротажу горизонтальних свердловин і АМК для відкритого

стовбура і похило-спрямованих і горизонтальних свердловин малого діаметра (БКЗ, БК) – ВАТ НВП ВНПГІС; АМК CompactTM (для ГІС у відкритому стовбурі, включає в себе багатозондову ІК, БК, МБК, МК) проводиться компанією Weatherford; АЕК (Автономний модуль багатозондового БК) – компанією «ПетроАльянс сервіс компані Лімітед (Кіпр)»; апаратура Логіс (БКЗ, подвійний БК, подвійний ІК, МБК) – компанією ТОВ «PiaLog».

Для повноти картини також необхідно розуміти, що структура організації ГДС має свою специфіку. Так, якщо в СРСР був створений чіткий ланцюжок виконання робіт (який можна умовно уявити у вигляді послідовності: науково-дослідний інститут – конструкторське бюро – завод – сервісна контора (Ітенберг, 1994; Комаров ..., 2001), то в іншому (капіталістичному) світі всі ці частини в тому чи іншому вигляді були зосереджені в кожній великій геофізичній фірмі.

Природно, що починаючи з 1990-х років структура геофізичного співтовариства країн колишнього СРСР також зазнала змін, які призвели до того, що наведений ланцюжок зруйнувався і його елементи стали самостійними суб'єктами комерційної або державної діяльності.

Існуюча відмінність вітчизняної геофізики від західної полягає в тому, що перший елемент ланцюжка, а саме інституту, залишилися відносно незалежними, так як зберегли підпорядкування Академії наук. Фундаментальні науки розробки зберегли свій статус і в повному обсязі стали частиною прикладної, або в сучасних термінах комерційної, геофізики. Інші елементи наведеного ланцюжка так чи інакше влилися в загальний геофізичний світ, з властивою йому закритістю досягнень, комерціалізацією всіх аспектів роботи, в тому числі і наукової.

На жаль, на сьогодні можна виділити порівняно небагато відкритих наукових структур, які продовжують займатися фундаментальними дослідженнями в галузі геофізики, на відміну від створених на основі колишніх науково-технічних колективів комерційних структур.

### **3.4. Допоміжні методи електрометрії**

Як демонструє практика, існуючі зондуючі багатозондові комплекси каротажу (БКЗ, 4ІК тощо) не завжди абсолютно точно дозволяють самостійно визначати на досліджуваному інтервалі малопотужні пласти з проникненням: дані їх каротажу можна інтерпретувати з однаковою похибкою як для щільних пластів без проникнення, так і як для пластів з проникненням. Тобто така інтерпретація, без додаткової інформації, має неоднозначність. Проте додаткова інформація про наявність проникнення дозволяє однозначно встановлювати геоелектричні параметри пластів.



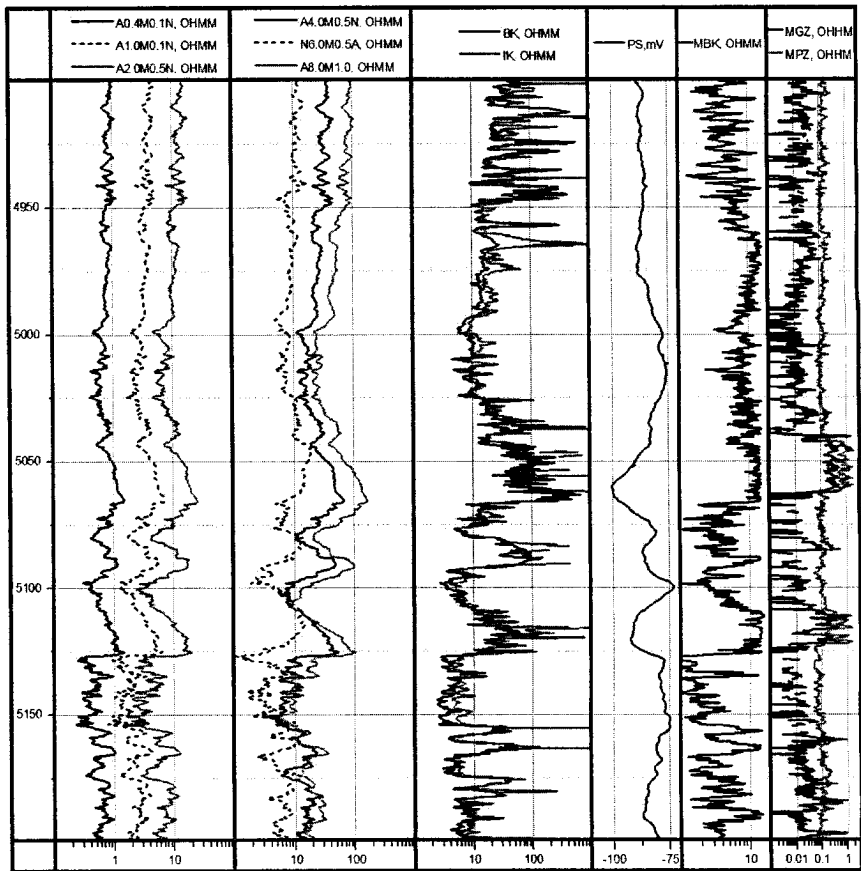


Рис. 3.21. Планшет запису БКЗ, БК, ІК, ПС, МБК та МК

Ми ілюстративно згадаємо лише про два таких методи каротажу. Перший з яких – мікрокаротаж – безпосередньо відноситься до ЕК.

Цей каротаж заснований на вимірі УО порід зондами малих розмірів, що притискаються до стінки свердловини. У мікрозондах електроди встановлюються на малій відстані один від одного (~ 2.5 см) на башмаку з електроізоляційного матеріалу. Щоб виключити вплив бурового розчину на результати вимірів, башмак притискають до стінки свердловини.

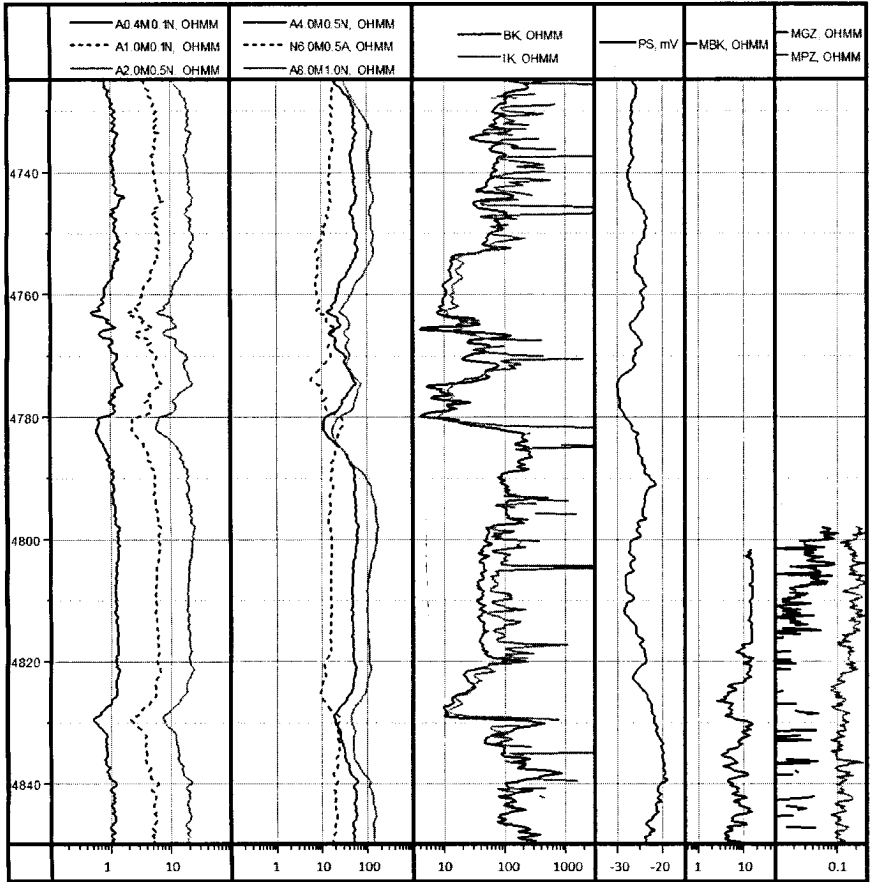


Рис. 3.22. Планшет запису БКЗ, БК, ІК, ПС та неповного запису МБК та МК

Як правило, на башмаку розміщують один потенціал-зонд (A0.05M з розміром зонда  $L = 0.05$  м) і один градієнт-зонд (A0.02M0.025N з розміром  $L = 0.0375$  м) меншої глибинності. На інтервалах пластів з проникненням, де є глиняна кірка, потенціал-зонд, як правило, повинен показувати більше значення УО. Такі інтервали під час інтерпретації визначають як інтервали, що є підозрілими на проникнення.

Проте слід розуміти, що в залежності від свердловинних умов і точності настройки апаратури таке перевищення може спостерігатись на всьому інтервалі запису (рис. 3.21), тому що поміж іншого покази

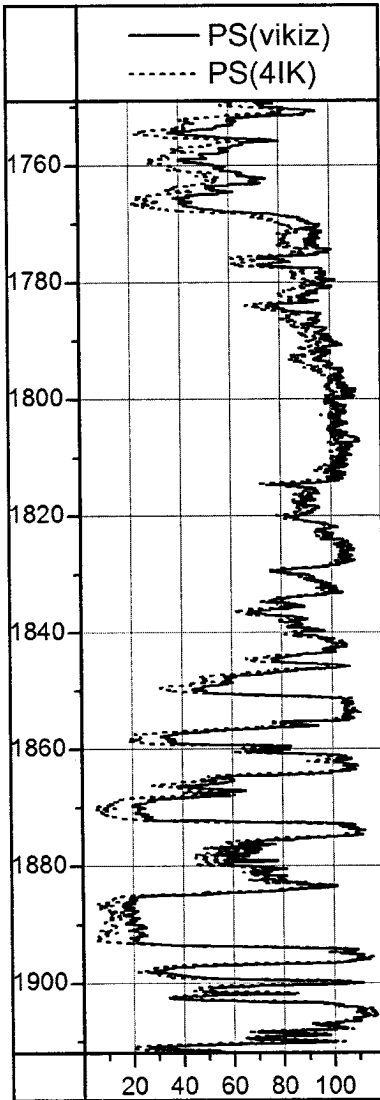


Рис. 3.23. Порівняння запису двох градієнт-ПС в одній свердловині двома різними приладами під час одного спуско-підйому

мікрометодів сильно залежать від ступеня притискання башмаку до стінки свердловини, що є не завжди стовідсотковим.

Крім того, якщо каротаж виконується в різних зв'язках або трапляються звичайні збої в роботі апаратури, то інформація по мікрокаротажу може бути наявна не на всьому інтервалі запису (рис. 3.22), тому не завжди можна покладатись на такі дані.

Це додатковий раз підкреслює, що краще мати комплекс електрометрії, який і без залучення додаткових методів може визначати інтервали з проникненням з подальшим точним визначенням їх геоелектричних параметрів.

Другий допоміжний метод потрібно згадати хоча б тому, що конструктивно він реалізується в одному корпусі із зондом ІК, бо до корпусу ІК (так само, як і до ВІКІЗ) висувається вимога радіопрозорості та електричної непровідності.

Метод ПС заснований на вимірах електрохімічних потенціалів, що виникають в гірських породах при перетині їх свердловиною.

Виникнення природного електричного поля у свердловині обумовлюється фізико-хімічними процесами, що відбуваються на границях між гірськими породами та буровим розчином і на границях між пластами.

Здатність гірських порід поляризуватися під впливом природних фізико-хімічних процесів (дифузійно-адсорбційних, фільтраційних, окисно-відновлювальних тощо) називають природною електрохімічною активністю, яка визначається мінералогічним складом, структурою порового простору, питомою поверхнею (дисперсністю), вологістю, фізико-хімічними властивостями пластових вод та ін.

Як показує практика, у формуванні природних електричних полів нафтових та газових покладів переважну роль відіграють дифузійно-адсорбційні процеси і, в деяких випадках, фільтраційні. Окисно-відновні процеси в свою чергу переважають у свердловинах, що розкривають рудні та вугільні поклади.

В ідеальному теоретичному варіанті для реєстрації ПС використовують окремих (від інших методів ЕК) електрод М, що переміщується вздовж свердловини, при цьому другий вимірювальний електрод N заземлюється на поверхні Землі. Даними каротажу буде записана різниця потенціалів  $\Delta U_{ПС} = U_M - U_N$ , причому оскільки потенціал електрода N можна вважати таким, що не змінюється в ідеальних умовах, то  $\Delta U_{ПС} = U_M - \text{const}$ .

Таким чином, результати вимірів являють собою криву зміни величини потенціалу електрода М по свердловині відносно деякого постійного, але невідомого значення потенціалу електрода N.

На практиці у свердловині знаходяться обидва електроди М та N, що розташовуються на незначній відстані один від одного (до 1 м), і, отже, вимірюється зміна  $\Delta U_{ПС}$  на відстані MN, тобто величина градієнту природного поля. Крива, що при цьому реєструється, називається кривою градієнту ПС. Фактично ми завжди маємо справу саме з кривими градієнту-ПС (рис. 3.22, 3.23).

УО	Потенціал ПС	Літологічна характеристика пласта
мінімальне	максимальний	глини, сильно глинисті алевроліти
мінімальне	мінімальний	піски, піщаники водонасичені
середнє і максимальне	мінімальний	піски, піщаники нафто- або газонасичені
максимальне	від максимального до мінімального	Ущільнені карбонатні породи слабо глиняні і не глиняні

Табл. 3.1. Визначення основних типів порід

ПС використовують для першого і якісного літологічного розчленування (див. таблицю 3.1). Для більш детального літологічного розчленування використовують так званий літофаціальний комплекс, а саме: ГК, нейтрон-нейтронний каротаж, гамма-гамма каротаж, АК, кавернометрія (Латышева, 1981). Криві ПС також можна використовувати для виділення границь пластів.

Слід мати на увазі, що, як і всі методи каротажу, ПС має свою похибку, як це добре видно з рис. 3.23.

# ПРЯМІ ЗАДАЧІ ЕЛЕКТРОМЕТРІЇ

## 4.1. Вибір числового методу

Що ми розуміємо під терміном «пряма задача ЕК» чи «пряма задача ІК»?

Насамперед ми маємо на увазі деякий існуючий спосіб отримання величини, яка із заданою точністю відповідає величині виміру конкретним зондом конкретного фізичного принципу виміру в конкретному положенні свердловинного розрізу.

Для опису реалізації такого способу нам необхідно формалізувати деякі поняття.

Під виміром при такому підході ми фактично маємо на увазі фізичні закони, їх математичний опис і можливість їх моделювання в той чи інший зручний спосіб.

Оскільки моделювання – річ доволі прикладна, краще все пояснювати на конкретних прикладах. Будемо розглядати апаратуру БКЗ, тобто розв'язувати пряму задачу ЕК.

На цьому прикладі «вимір» – це реєстрація властивостей електричного поля в провідному середовищі (а саме потенціалу та струму в заданих точках). З математичної точки зору для розв'язання такої прямої задачі нам знадобиться розв'язати рівняння дивергенції (в області, де відсутні джерела струму) із змінними коефіцієнтами:

$$\operatorname{div} \vec{j} = \operatorname{div}(\sigma \vec{E}) = 0. \quad (4.1.1)$$

З точки зору моделювання це означає реалізувати процедуру числового розв'язання такого рівняння будь-яким зручним способом, але з похибкою,

що не перевищує заздалегідь задану (бажано досить малу) величину. Наприклад, методом скінченних різниць чи скінченних елементів.

Вибір конкретного числового методу залишається за дослідником.

Ми будемо використовувати метод інтегральних струмів.

Для цього замінімо середовище дискретною моделлю, яка буде описана неоднорідною СЛАР, що описує електроінтегратор (Миرونцов, 2004; 2007а; 2009с).

Запишемо в кожному вузлі другий закон Кірхгофа (інтегральний аналог рівняння неперервності вектора щільності струму рівняння (4.1.1)):

$$\frac{U_i^{j+1} - U_i^j}{R_{j,i}^{j+1,i}} - \frac{U_i^j - U_i^{j-1}}{R_{j-1,i}^{j,i}} + \frac{U_{i+1}^j - U_i^j}{R_{j,i}^{j,i+1}} - \frac{U_i^j - U_{i-1}^j}{R_{j,i-1}^{j,i}} = 0, \quad (4.1.2)$$

$$i = \overline{1, n}, j = \overline{1, m},$$

де  $U_i^j$  – потенціал у вузлі  $j, i$ ;  $n$  – кількість вузлів по вертикальній осі;  $m$  – кількість вузлів по горизонтальній осі;  $R_{j,i}^{j+1,i}$ ,  $R_{j-1,i}^{j,i}$  – опори між вузлами  $(j+1, i)$ ,  $(j, i)$  і  $(j, i+1)$ ,  $(j, i)$  відповідно (для вузлів, що знаходяться на осі,  $z$ , в знаменник необхідно внести зміну на відповідну зміну кроку):

$$R_{j,i}^{j+1,i} = \int_{\Delta r} \rho \frac{dr}{2\pi \Delta z (r_0 + (j-0.5)\Delta r)}, \quad (4.1.3)$$

$$R_{j,i}^{j,i+1} = \int_{\Delta z} \rho \left[ \frac{dz}{\pi \left[ (r_0 + (i+0.5)\Delta r)^2 - (r_0 + (i-0.5)\Delta r)^2 \right]} \right]. \quad (4.1.4)$$

У (4.1.3), (4.1.4) – крок апроксимації за координатами  $r, z$  відповідно,  $r_0$  – радіус зонда.

Зауважимо, що система (4.1.2) не зміниться (тип і кількість рівнянь) при будь-якій кількості і будь-якому розташуванні коаксіальних границь з координатами  $i \cdot \Delta r$  або границь, нормальних до осі свердловини з координатами  $j \cdot \Delta z$  в моделі з плоско-паралельним їх розташуванням, а зміняться тільки (4.1.3) і (4.1.4), так як зміна моделі провідного середовища призведе тільки до перерахунку відповідних інтегралів – коефіцієнтів системи.

Випадок, коли  $\rho = \rho(z, r)$  неперервно змінюється разом зі своєю похідною, також не вимагає зміни кількості чи типу рівнянь системи.

Таким чином, розв'язання прямої задачі ЕК полягає в наступному:

- завдання прямокутної сітки (дискретної моделі середовища);
- розв'язання системи (4.1.2) для однорідного середовища з ПО, рівним одиниці для розрахунку коефіцієнтів зонда (зондів);
- розрахунок коефіцієнтів системи (4.1.3), (4.1.4) і її розв'язання для заданої моделі середовища.

Граничні умови для похідної функції (умови Неймана) на нескінченності і на поверхнях ізоляторів самого приладу виконуються автоматично: з огляду на обмеженість сітки струм не може поширюватися в напрямку, де сітка відсутня.

Ненульові граничні умови на поверхнях електродів досягаються додаванням до правої частини відповідних рівнянь (4.1.2) величини струму, що стікає з електрода.

Таким чином ми маємо неоднорідну СЛАР, що має єдиний розв'язок, який, крім того, може бути виражений через визначник системи (Льїн, Позняк, 1978). Отже, для заданої геометрії зонда (заданих граничних умов) розв'язання прямої задачі для будь-якого 2D просторового розподілу ПО не вимагає зміни системи розв'язуваних рівнянь, а вимагає лише зміни її коефіцієнтів.

Зауважимо, що система без обмеження загальності допускає використання сітки з нерівномірним кроком.

Тепер відзначимо, що якщо при розв'язанні прямої задачі використовується якийсь власний спосіб чи використовується якесь власне наближення, що повинно спростити числовий алгоритм, то його треба обґрунтувати.

Для прикладу обґрунтуємо запропонований спосіб розв'язання прямої задачі ЕК.

Покажемо, що перехід від диференціального рівняння (4.1.1) до інтегрального аналогу (4.1.2) вибором (4.1.3), (4.1.4) є обґрунтованим. Тобто, що перехід від інтегрального запису до диференціального переводить систему (4.1.2) до системи скінченних різниць з прямокутною сіткою, що дозволяє використовувати всі теореми про збіжність і стійкість методу (в однорідному середовищі). Крім того, відповідність (4.1.2) і (4.1.1) впливає з рівняння неперервності, яке в ЦСК має вигляд:

$$\frac{j_r}{r} + \frac{\partial j_r}{\partial r} + \frac{\partial j_z}{\partial z} = 0.$$

Зауважимо, що компоненти  $I_r$ ,  $I_z$  повного струму пов'язані з його щільністю:



$$I_r = j_n \cdot r \cdot 2\pi \cdot \Delta z,$$

$$I_z = j_z \cdot \left( (r + \frac{\Delta r}{2})^2 - (r - \frac{\Delta r}{2})^2 \right) \cdot \pi \cdot \Delta r = j_z \cdot r \cdot \Delta r \cdot 2\pi.$$

Після чого скористаємося перетвореннями:

$$\frac{j_r}{r} + \frac{\partial j_r}{\partial r} = \frac{I_r}{r^2 \cdot 2\pi \cdot \Delta z} + \frac{\partial I_r}{\partial r} \cdot \frac{1}{r \cdot 2\pi \cdot \Delta z} - \frac{I_r}{r^2 \cdot 2\pi \cdot \Delta z} = \frac{\partial I_r}{\partial r} \cdot \frac{1}{r \cdot 2\pi \cdot \Delta z},$$

$$\frac{\partial j_z}{\partial z} = \frac{\partial I_z}{\partial z} \cdot \frac{1}{r \cdot \Delta r \cdot 2\pi}.$$

І остаточно отримаємо:

$$\frac{j_r}{r} + \frac{\partial j_r}{\partial r} + \frac{\partial j_z}{\partial z} = \frac{1}{\Delta r} \cdot \left( \frac{\partial I_r}{\partial r} + \frac{\partial I_z}{\partial z} \right) = 0,$$

або:

$$\frac{\partial I_r}{\partial r} + \frac{\partial I_z}{\partial z} = 0.$$

Що і є еквівалентом рівнянь (4.1.2), які описують нашу дискретну модель.

Так само можна показати, що наведена у третій главі СЛІАР (3.1.6), (3.1.7) для розв'язання прямої задачі ІК, у диференційному вигляді відповідає СРМ.

Взагалі кажучи, при розв'язанні прямої задачі електрометрії можна використовувати будь-який, навіть реалізований іншими дослідниками, метод. На сьогодні придбати програму числового розв'язання рівняння Лапласа чи системи рівнянь Максвелла не є проблематичним.

Наприклад, для задач саме ЕК і ІК добре себе зарекомендував програмний пакет FemLab (University of Florida).

Але потрібно пам'ятати, що при використанні програмного продукту, створеного іншими дослідниками, слід переконатися, що:

- цей програмний продукт точно розв'язує поставлену задачу;
- ви його використовуєте коректно і тому отримані результати є вірними;

– при подальшій необхідності вирішувати обернену задачу (розв'язання якої вимагатиме неодноразового розв'язання прямих задач, в тому числі, можливо, в режимі реального часу) цей програмний продукт також можна буде використовувати.

## **4.2. Базові геоелектричні моделі і їх типові характеристики**

Для розв'язання прямої задачі електрометрії, крім числового методу, потрібно ще задати граничні умови (дехто їх називає «початкові», але з точки зору математичної термінології це не є коректним, оскільки ми розв'язуємо в кожній точці стаціонарні диференціальні рівняння в часткових похідних і, отже, у нас не має початкових умов, а є тільки граничні). Тобто необхідно задати модель середовища, в якому ми досліджуємо властивості електричного чи електромагнітного полів.

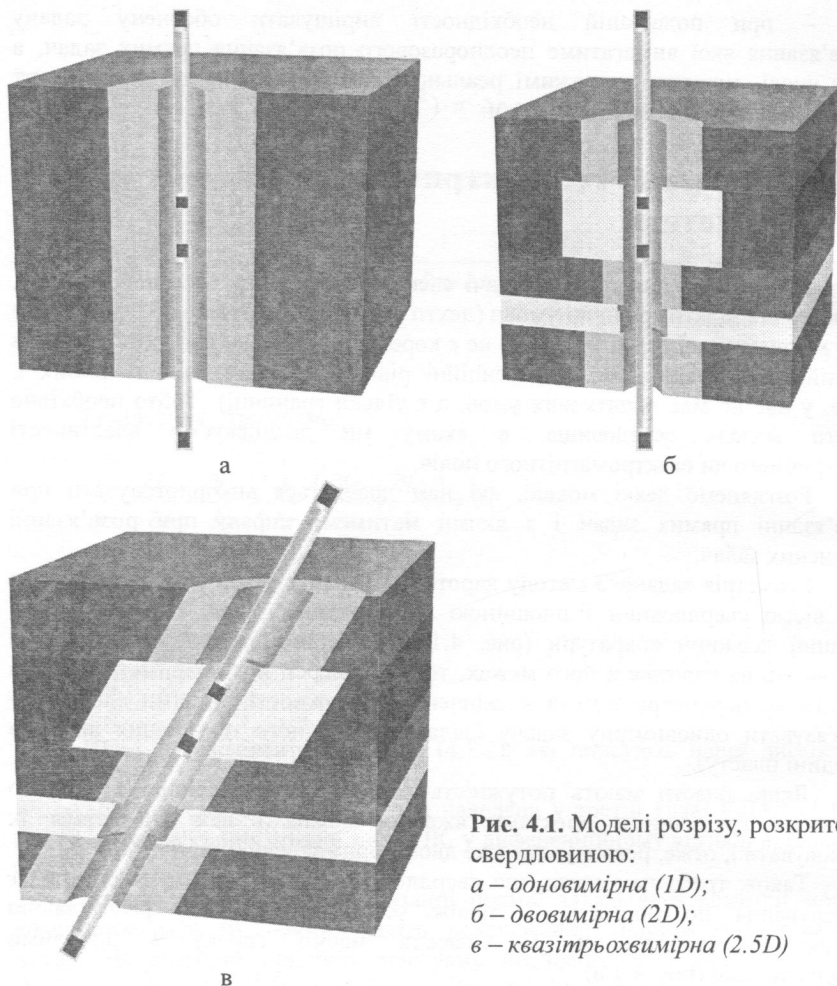
Розглянемо деякі моделі, які нам доведеться використовувати при розв'язанні прямих задач і з якими матимемо справу при розв'язанні обернених задач.

Геометрія заданого методу каротажу визначається в основному кутом між віссю свердловини і площиною нашарування. Якщо пласт набагато більший довжини апаратури (рис. 4.1.а) і сусідні (вміщуючі) пласти не впливають на каротаж в його межах, то при інверсії його параметри можна шукати як параметри пласта нескінченної потужності. Іншими словами – розв'язувати одновимірну задачу (задачу для одного положення зонда в середині пласту).

Якщо пласти мають потужність порівнянну з довжиною зондів, то нехтувати граничними ефектами вже не можна і нам доведеться їх враховувати і, отже, розв'язувати вже двовимірну задачу (рис. 4.1.б.).

Також треба пам'ятати, що свердловина майже ніколи не розкриває нашарування по нормалі. А також усвідомлювати, що розглядаючи вертикальні свердловини, ми завжди маємо справу з похилими свердловинами (рис. 4.1.в).

Остання ситуація не є катастрофічною, оскільки інтерпретатори завжди це розуміють і мають поправочний коефіцієнт за кут нашарування. Тому надалі ми будемо вважати всі свердловини, що розглядаються – вертикальними, з нормальними до осі свердловини границями пластів (які надалі будемо називати горизонтальними границями). Тобто ми обмежимося випадком двовимірних задач.



**Рис. 4.1.** Моделі розрізу, розкритого свердливиною:

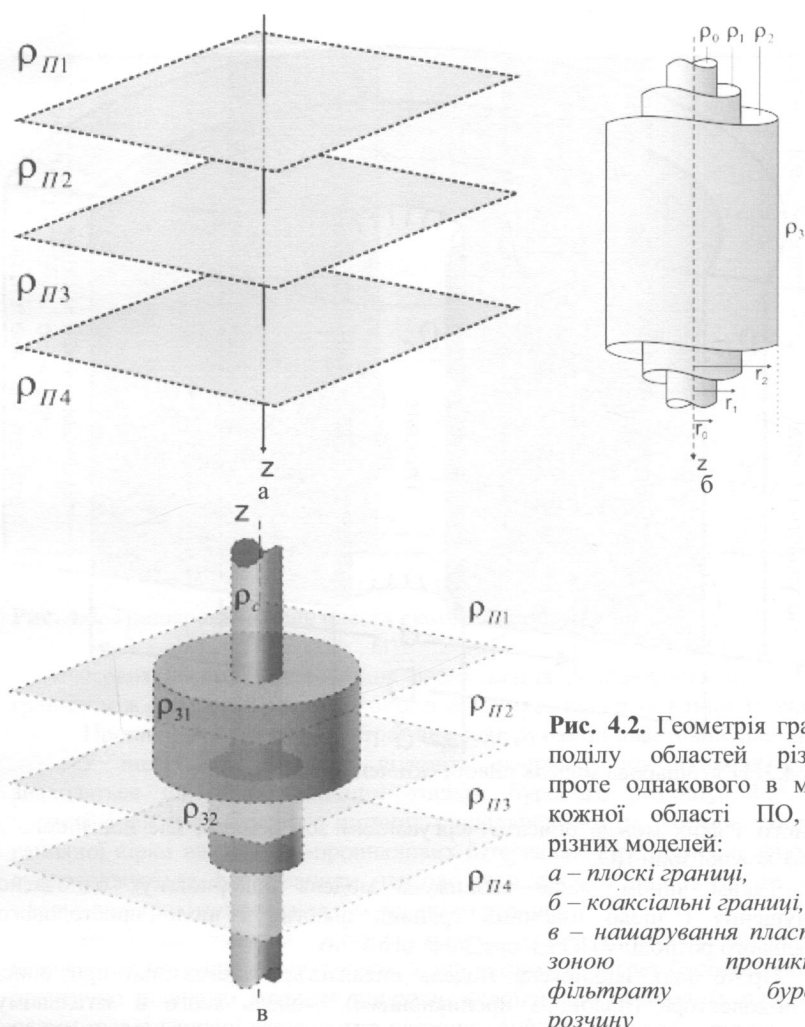
*а* – *одновимірна (1D)*;

*б* – *двовимірна (2D)*;

*в* – *квазітрьохвимірна (2.5D)*

Користуючись цим і враховуючи аксіальну симетрію нашої задачі, ми будемо вважати, що просторовий розподіл неперервної величини ПО допускає кусково-постійну апроксимацію з високим ступенем точності і така апроксимація можлива для подальшого використання результатів розв'язання оберненої задачі.

Отже, навколосвердловинний простір складається з областей різного, але постійного в межах кожної області ПО, при цьому границі цих областей



**Рис. 4.2.** Геометрія границь поділу областей різного, проте однакового в межах кожної області ПО, для різних моделей:  
*а* – плоскі границі,  
*б* – коаксіальні границі,  
*в* – нашарування пластів із зоною проникнення фільтрату бурового розчину

утворені або площинами, нормальними до осі свердловини (рис. 4.2.а), або коаксіальними циліндрами, співвісними із свердловиною (рис. 4.2.б).

Саме такі границі дозволяють легко задавати геометрію середовища (рис. 4.2.в), що складається з нашарування пластів, радіальну зміну ПО

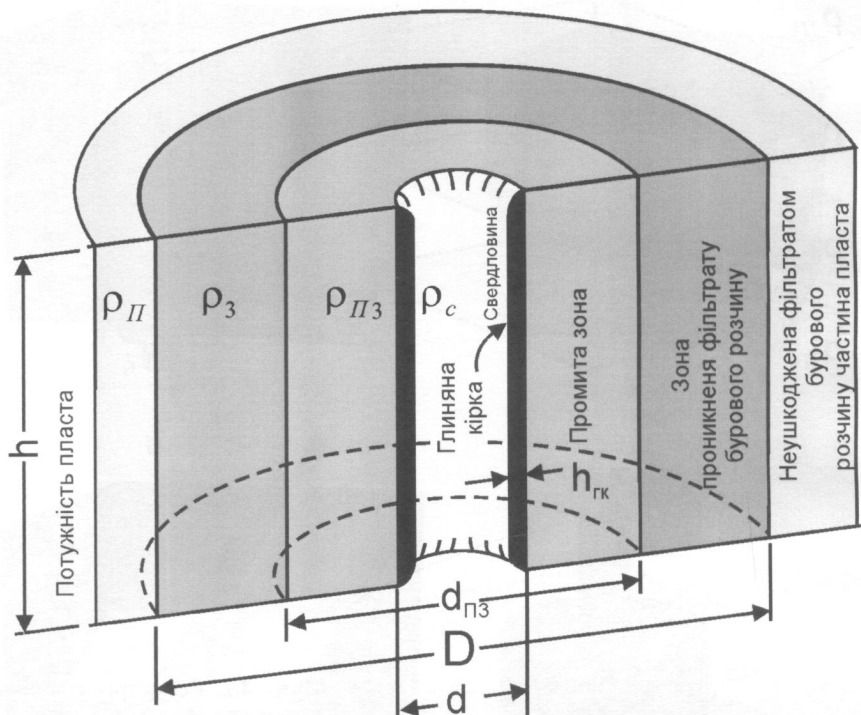


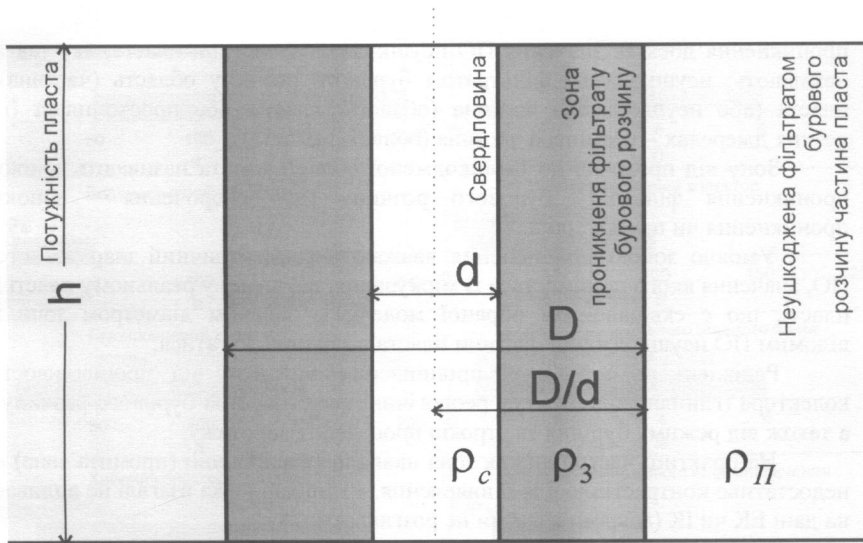
Рис. 4.3. П'ятишарова модель пласта скінченної потужності

кожного з яких можна описати чергуванням зон різного, але постійного в межах кожної зони ПО.

Таким чином, наша наближена модель використовує одночасно припущення і щодо взаємних границь пластів, і щодо просторового радіального розподілу ПО вздовж кожного з них.

Проте така наближена модель виявляється адекватною при описі пласта-колектора (пласта з проникненням), модель якого в загальному випадку вважають п'ятишаровою (рис. 4.3), оскільки саме така кількість шарів має просте фізичне пояснення.

Розподіл ПО вздовж пласта змінюється в процесі і одразу після буріння. Найбільша інтенсивність витіснення спостерігається при бурінні під час руйнування породи долотом. В цей час відбувається випереджуюче проникнення фільтрату. Говорити про рівноважний розподіл ПО вздовж пласта іноді можна тільки через значний час після завершення буріння (від тижнів до місяців). Відповідні перехідні стадії процесу виявляють при аналізі



**Рис. 4.4.** Тришарова модель пласта скінченної потужності

різничасових досліджень. Глибина проникнення та швидкість зміни ПО на границі між флюїдами різної солоності залежать і від проникливості пласта.

Проникаючи у пори, фільтрат витісняє рухомий пластовий флюїд.

У подальшому раніше відкриті інтервали проникливих пластів знаходяться під гідростатичним тиском бурового розчину. Фільтрація водяної фази із-за бурового розчину уповільнюється за рахунок утворення глиняної кірки на пористо-проникливих інтервалах. Проникнення фільтрату супроводжується формуванням навколо свердловини зони з іншим, ніж у пласті, електрохімічним складом водяного розчину.

Найбільш змінена частина пласта поблизу стінки свердловини називається його промитою зоною. У цій частині фільтрат бурового розчину практично повністю витісняє природні флюїди, що насичують пласт. При цьому тверді глиняні частинки та частинки вибуреної породи, що не можуть проникнути в пори пласта, залишаються на його поверхні, утворюючи так звану глиняну кірку.

Фільтрат бурового розчину, проникаючи далі у пласт, змішується з пластовою рідиною, і ПО цієї зони змінюється в радіальному напрямку (по нормалі до осі свердловини). Із збільшенням відстані від стінки свердловини об'єм фільтрату в одиниці об'єму породи поступово зменшується і ПО зони

проникнення досягає значення ПО неушкодженої частини пласта, яку так і називають: неушкоджена фільтратом бурового розчину область (частина) пласта (або неушкоджена частина (область) пласта, або просто пласт (в деяких джерелах – незмінена частина (область) пласта)).

Зону від промитої до неушкодженої області пласта називають зоною проникнення фільтрату бурового розчину (для скорочення – зоною проникнення чи просто зоною).

Умовно зоною проникнення вважають концентричний шар деякого ПО, значення якого приймається із міркування, що вимір у реальному пласті і пласті, що є еквівалентом обраної моделі, із заданим діаметром зони і відомим ПО неушкодженої частини пласта – повинні збігатися.

Радіальні розміри зони проникнення залежать від проникливості колектора (глиняного цементу), реологічних властивостей бурового розчину, а також від режиму буріння та строків проведення каротажу.

На практиці часто ближня зона навколо свердловини (промита зона) є недостатньо контрастною для її виявлення, а глиняна кірка взагалі не впливає на дані ЕК чи ІК (мікрометоди ми не розглядаємо).

У таких випадках замість п'ятишарової моделі використовують тришарову модель пласта з проникненням (рис. 4.4). Саме така модель притаманна актуальним моделям пластів в умовах Дніпровсько-Донецької западини і більшості моделей колекторів теригенних розрізів Західного Сибіру, отже, ми обмежимося розглядом саме таких тришарових моделей пластів.

Для прямого моделювання і потім для тестування оберненої задачі, а взагалі і при інтерпретації конкретних даних каротажу дуже зручно мати набір стандартних (типових) моделей пластів, притаманних тим чи іншим умовам у тих чи інших родовищах. Це не тільки дозволяє тестувати алгоритми на матеріалі, який є найбільш очікуваним у подальшій роботі, а і представляти результати у зрозумілій для інших дослідників формі.

Нами в основному використовуються моделі пластів, що відповідають умовам Західного Сибіру (Технологія ..., 2001) та умовам ДДЗ (Єгурнова та ін., 2005; Миронцов, 2012а; 2012б; 2012с):

#### **Пласт (ущільнений) низького проникнення (рис. 4.5.а).**

Модель – двошарова. Відмінна особливість – стабільний діаметр свердловини, що практично завжди відповідає номінальному, та високе значення ПО у межах 50 Ом·м і більше (як правило, до 200 Ом·м).

#### **Глиняний пласт (рис. 4.5.б).**

Найбільш адекватна модель – двошарова (чи тришарова із зовсім невеликою (непомітною для комплексів електрометрії, що розглядаються) зоною). Має достатньо складну структуру та часто представлений тонкошаровим чергуванням алевролітів з аргілітами із заглинзованими

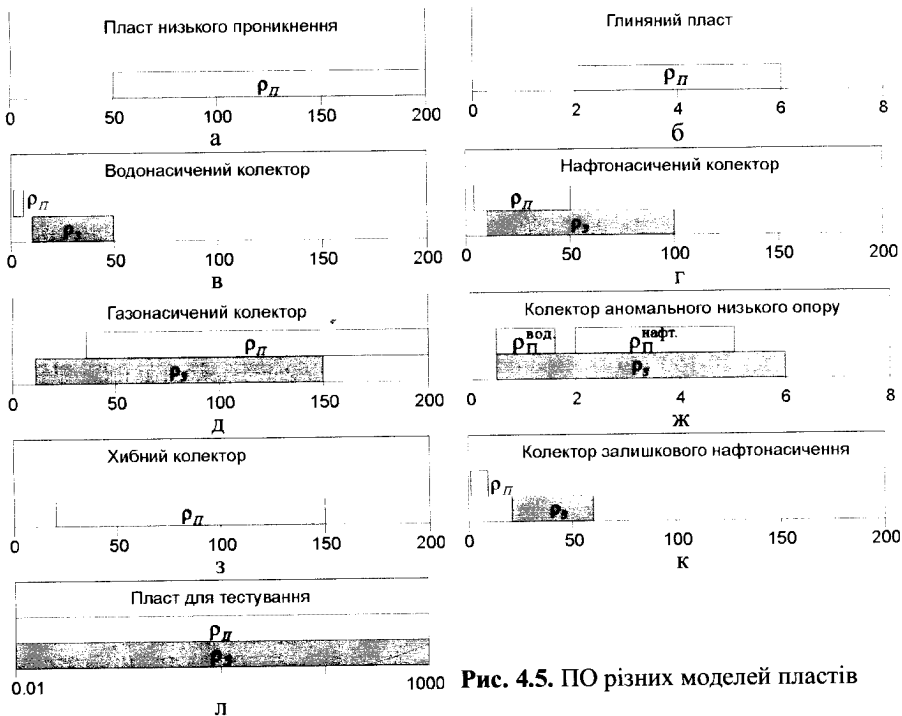


Рис. 4.5. ПО різних моделей пластів

пісковиками. Профілю притаманна кавернозність. ПО у межах 2.0-6.0 Ом·м.

#### Водонасичений колектор (рис. 4.5.в).

Широко розповсюджений тип колекторів у теригенних розрізах. Характерні особливості – підвищуючий тип проникнення, можливі великі розміри зони  $D/d = 2 - 20$ . При цьому опір зони проникнення складає 10-50 Ом·м, пласта – 2-6 Ом·м. У деяких випадках можливе нейтральне проникнення.

#### Нафтонасичений колектор (рис. 4.5.г).

Характерна особливість – наявність підвищуючого чи нейтрального проникнення. Опір пласта 4-50 Ом·м, опір зони вище, ніж у водонасиченого колектора, і може змінюватись у межах 10-100 Ом·м. У тонкошарових пісково-глиняних колекторах може існувати мала або слабо контрастна за ПО зона проникнення.



#### **Газонасичений колектор (рис. 4.5.д).**

Можливий як підвищуючий, так і знижуючий тип проникнення. ПО зони проникнення 10-150 Ом·м, ПО пласта 30-200 Ом·м, можливі великі розміри зони  $D/d = 2 - 20$ .

#### **Колектор аномально низького опору (рис. 4.5.ж).**

Можливе як водонасичення (ПО пласта 0.5-1.5 Ом·м), так і нафтонасичення (ПО пласта 2-5 Ом·м), ПО зони 0.5-6 Ом·м, можливі великі розміри зони  $D/d = 2 - 20$ . Такі значення пояснюються насамперед наявністю значної кількості залишкової води, що пов'язано з дрібнозернистістю, поліміктованістю складу колектора і крихкістю його структури.

#### **Хибні колектори (рис. 4.5.з).**

ПО 20-150 Ом·м. Проникнення немає. Відрізняється від типу «Пласт низького проникнення» кавернозністю стінок свердловини. За геофізичними характеристиками інших методів можуть мати всі ознаки колектора. До таких пластів належать як пісковики, так і великоуламкуваті породи, якщо до складу з'єднуючої їх речовини входить в значній кількості сіль. Утворення цих «колекторів» пов'язане з явищами вилуговування солі з цементуючої речовини у навіколосвердловинній зоні, що підтверджується керном.

#### **Колектор залишкового нафтонасичення (рис. 4.5.к).**

Сильно підвищуюче проникнення. ПО пласта 2-10 Ом·м, ПО зони 20-60 Ом·м. Виділяється в окремий тип, тому що часто в умовах ДДЗ пісковики, поровий простір яких на 60% і більше заповнено, за розрахунками, нафтою, під час випробування можуть давати пластову воду і, навпаки, чисту нафту можуть віддавати пласти, водонасичення яких досягає 60%.

Зрозуміло, що такий перелік не є вичерпним і якщо при розв'язанні конкретної задачі трапиться пласт, що не підходить під жоден тип цього набору чи будь-якого іншого – це не означає, що допущена помилка при розв'язанні.

Взагалі кажучи, для тестування не можна обмежуватись тільки одним якимось набором моделей пластів. Навпаки, треба бути готовим до будь-яких параметрів провідності пласта (рис. 4.5.л), а саме ПО пласта та ПО зони може бути у межах 0.01-1000 Ом·м або, простіше кажучи, із змінними параметрами для всього робочого діапазону апаратури, що моделюється.

### **4.3. Тестування розв'язання прямої задачі**

Фактично у попередніх главах було наведено вже не один приклад розв'язку прямої задачі як ЕК, так і ІК, отже, може скластись враження, що якщо ми маємо спосіб розв'язання прямої задачі, що здатен надавати

результати для будь-яких 2D моделей розрізів та будь-яких зондів ЕК та ІК, то питання розробки алгоритму розв'язання прямих задач і, тим більше, його програмної реалізації можна вважати вирішеним.

Але розгляд алгоритмів розв'язання прямих задач та способів їх програмної реалізації не може бути закінченим без найголовнішого етапу – перевірки достовірності результатів, які нам надають розроблені і реалізовані алгоритми.

Іншими словами, недостатньо мати спосіб розв'язання прямої задачі, який видає певні результати в залежності від зміни граничних умов. Для того щоби впевнено сказати, що ми маємо спосіб (і його програмну реалізацію) розв'язання прямої задачі – слід переконатись, що обраний спосіб є коректним і правильним, а всі отримані результати – вірні (в межах допустимої похибки).

Слід мати на увазі, що перевірка будь-якого програмного продукту є творчим процесом. У такому процесі фантазія дослідника не може бути зайвою і чим більше перевірок той чи інший спосіб витримає – тим краще.

Але не варто недооцінювати інший бік і значущість людського фактора, адже і помилки можуть трапитись через суто людську неуважність. Тому для виявлення будь-яких помилок в усьому процесі від самого початку визначення граничних умов задачі і до моменту візуалізації результатів всі кроки алгоритму повинні бути ретельно перевірені.

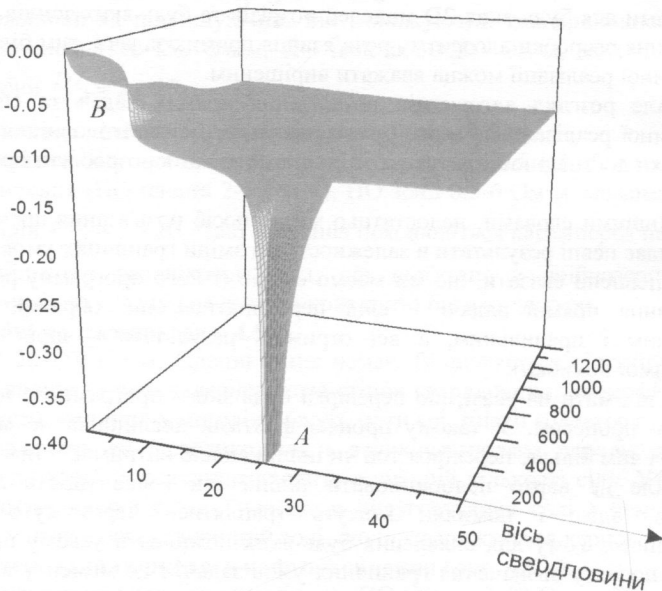
Отже, перш ніж почати користуватись нашим (чи будь-яким іншим) способом розв'язання прямої задачі (тим більше використовувати його для розв'язання обернених задач), ми повинні його перевірити.

Розглянемо спочатку задачі ЕК.

Тут можна почати з простого дослідження поля потенціалу, яке розраховується під час розв'язання прямої задачі.

На рис. 4.6 наведено просторовий розподіл потенціалу електричного поля для випадку нефокусованого зонда (точковий електрод  $A$  і обернений  $B$ , що розташовано на провідному обплетенні кабеля). Аналізуючи цей розподіл, ми одразу можемо сказати, що граничні умови задані вірно (навіть протяжне провідне обплетення каротажного кабеля добре спостерігається); в середині області розв'язання немає екстремумів (тобто результат відповідає умові монотонності для гармонічних функцій); на границях області похідна потенціалу прямує до нуля.

Такий самий аналіз можна повторити для граничних умов, що відповідають фокусованому зонду БК-3 (див. рис. 4.7). Аналізуючи в цьому випадку просторовий розподіл поля потенціалу, можна навіть побачити місця, що відповідають ізоляторам між електродами  $A$ ,  $Ab$ ,  $At$ , і визначити потенціал у стінки приладу в цих місцях.



**Рис. 4.6.** Розподіл потенціалу електричного поля для випадку нефокусованого зонда (точковий електрод *A* і обернений *B*, що розташовано на провідному облєтєнні кабєля)

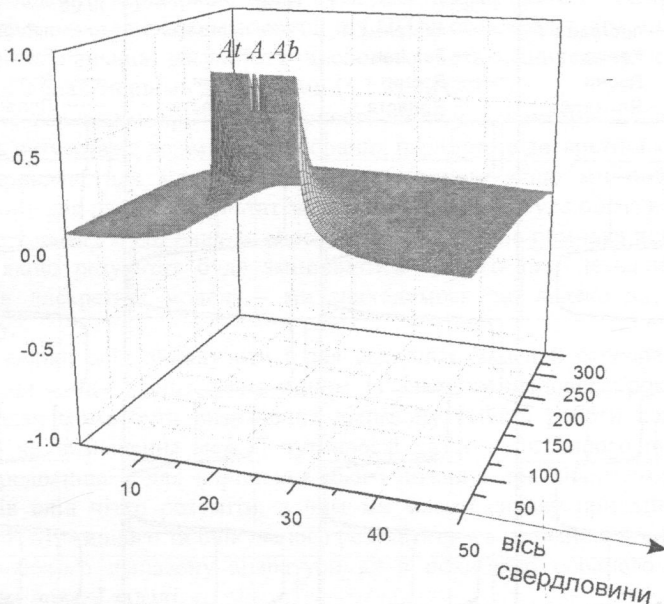
Взагалі перевірка відповідності потенціалу в околі осі свердловини необхідна ще й тому, що в системі ЦСК (а при аксіальній симетрії такі задачі природно розв'язувати саме в цій системі координат) рівняння Лапласа:

$$\frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left( r \frac{\partial U}{\partial r} \right) + \frac{\partial^2 U}{\partial r^2} + \frac{1}{r^2} \frac{\partial^2 U}{\partial \varphi^2} = 0, \quad (4.3.1)$$

при  $r = 0$  має особливість виду  $\frac{1}{0}$ .

При множенні рівняння (4.3.1) на  $r^2$ :

$$r \frac{\partial}{\partial r} \left( r \frac{\partial U}{\partial r} \right) + r^2 \frac{\partial^2 U}{\partial r^2} + \frac{\partial^2 U}{\partial \varphi^2} = 0, \quad (4.3.2)$$



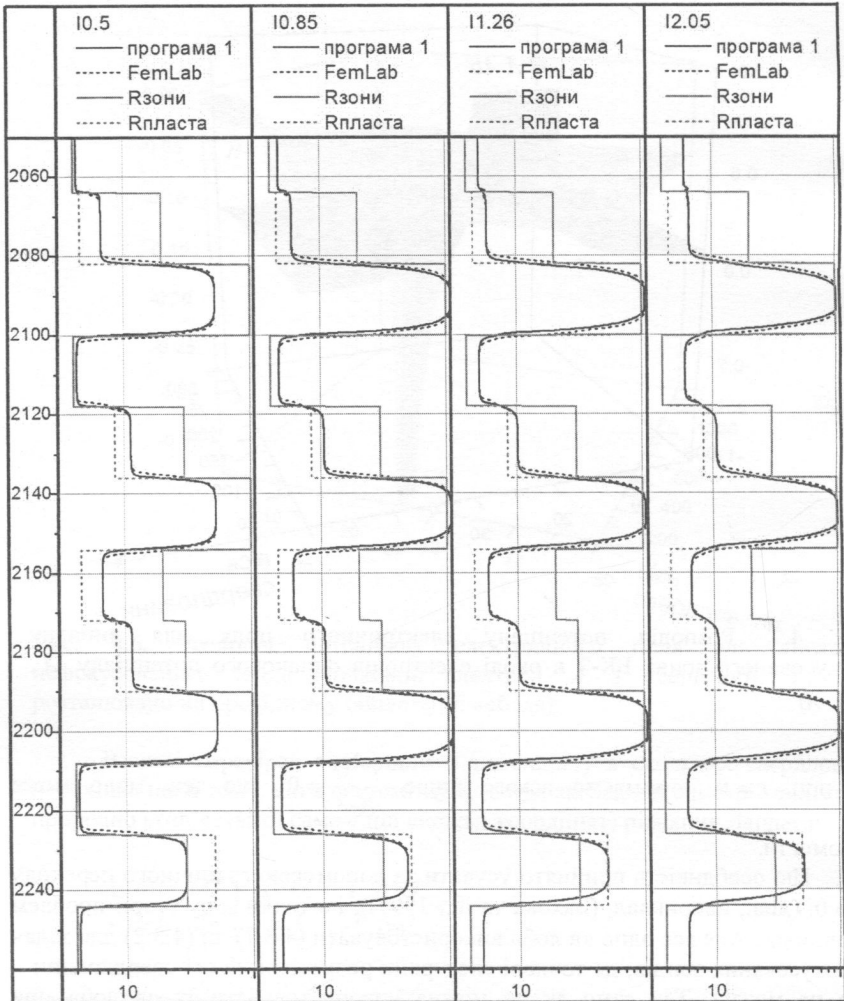
**Рис. 4.7.** Розподіл потенціалу електричного поля для випадку сфокусованого зонда БК-3 в околі електродів однакового потенціалу  $A$ ,  $Ab$ ,  $At$

ми при  $r = 0$  отримаємо всього лише  $\frac{\partial^2 U}{\partial \varphi^2} = 0$ , що теж мало може допомогти.

Цю особливість прийнято усувати за допомогою граничного переходу  $r \rightarrow 0$  (див., наприклад, (Бахова та ін., 1999)), і з точки зору теорії проблем не виникає. Але все одно «в лоб» використовувати (4.3.1) чи (4.3.2) для задач нефокусованих зондів, де точкові електроди розміщені на осі свердловини – вже не можна. Так само як не можна використовувати їх «в лоб» при числовому знаходженні реальних значень коефіцієнтів цих зондів в цьому ж припущенні.

Така сама проблема виникає в задачах ІК, якщо розглядати рівняння для вектор-потенціалу в ЦСК.

До речі, числовий розрахунок коефіцієнтів зондів також є хорошим тестом алгоритму, адже його результати можна завжди порівняти з розрахованими по (2.1.2).



**Рис. 4.8.** Приклад порівняння результатів розв'язання прямої задачі ІК різними програмами

Перевіркою на помилку у формуванні рівнянь дискретної моделі може слугувати сумування струму, що перетинає оболонку, яка містить всередині один чи кілька струмових електродів відомої сили струму.

Для задач ІК перевіркою може бути дослідження залежності величини скін-ефекту в однорідному середовищі від ПП цього середовища чи частоти чи взагалі порівняння результату числового розв'язання в однорідному середовищі з аналітичними формулами (3.1.8) чи (3.1.9).

Дуже важливим критерієм вірності вибору параметрів алгоритму є чутливість результатів до зміни вже обраних параметрів дискретної моделі.

Наприклад, для методу скінченних різниць, якщо ми подрібнимо кроки сітки у два рази, а результат зміниться на 1%, це буде показником, що принаймні в цьому місці нашого способу найімовірніше помилка відсутня. І, навпаки, якщо результат буде змінюватись суттєво при незначній зміні параметрів дискретної моделі – ми знаходимось ще далеко від вірного результату.

Перевірки слід виконувати і для складних моделей середовища. Це потрібно тому, що в решті-решт одним із завдань числового розв'язання прямих задач може бути визначення діапазону стійкої роботи конкретної апаратури чи визначення меж її чутливості до того чи іншого параметра моделі середовища. І для вирішення цього питання при аналізі отриманих результатів слід чітко розуміти, з чим ми маємо справу при виникненні розбіжності отриманого та очікуваного результату – з реальним досягненням границі робочого діапазону апаратури чи з похибкою обраного способу розв'язання прямої задачі.

Дуже інформативною перевіркою роботи алгоритму є порівняння його результатів з іншим.

Для такого порівняння можна використовувати комерційні програмні продукти, на кшталт згаданого вище FemLab (University of Florida).

Хоча, користуючись такими пакетами, потрібно бути дуже уважним, бо, наприклад, той самий FemLab при намаганні розв'язати пряму задачу ЕК «в лоб» для точкових електродів, розташованих на осі свердловини, в ЦСК може видавати результат, помилковість якого одразу не буде помітна.

Але при коректному використанні для тестування власних програм користь від комерційних програм важко переоцінити.

Так, на рис. 4.8 наведено каротажні діаграми зондів комплексу 4ІК для пачки пластів (яка містить у різній послідовності моделі пластів, що відповідають водонасиченим, нафтонасиченим, газонасиченим, глиняним та ушільненим), отримані способом розв'язання прямої задачі ІК, що було описано у главі 3 (позначено "програма 1"), та отримані за допомогою FemLab (позначено "FemLab").

Ще одним видом дуже інформативного тестування є порівняння не з комерційними способами моделювання електричних та електромагнітних полів взагалі, а з реалізованими іншими дослідниками способами саме для задач електрометрії, для тих самих моделей і тих самих зондів.

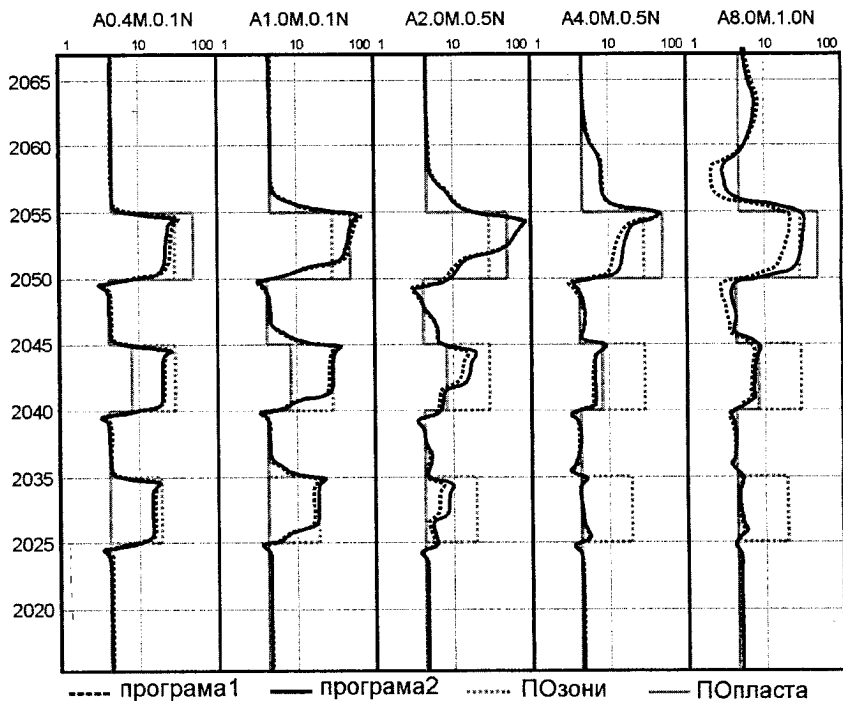


Рис. 4.9. Приклад порівняння розв'язання прямої 2D задачі програмами, розробленими і реалізованими різними авторами, для перерізу, що містить трьохшарові пласти ( $\rho_C = 2 \text{ Ом}\cdot\text{м}$ ;  $r_C = 0.1 \text{ м}$ )

Наведемо приклад одного такого порівняння, яке виконувалось в м. Новосибірськ, куди автор (після узгодження форматів завдання граничних умов і виводу результатів) передав власну програму розв'язання двовимірної прямої задачі БКЗ у розрізі.

Новосибірські колеги (на жаль, без дозволу не можна називати ні авторів програми, ні її назву) виконали серію розрахунків розробленою ними програмою («програма 1» на рис. 4.9 та 4.10) і програмою автора («програма 2» на рис. 4.9 та рис. 4.10) і порівняли їх результати.

При обговоренні результатів порівняння було встановлено, що деякі розбіжності можуть виникати внаслідок різного представлення при моделюванні оберненого струмового електрода (в програмі автора він представлений не у вигляді точкового електрода, а у вигляді провідного обплетення каротажного кабелю на скінченній відстані від прямого

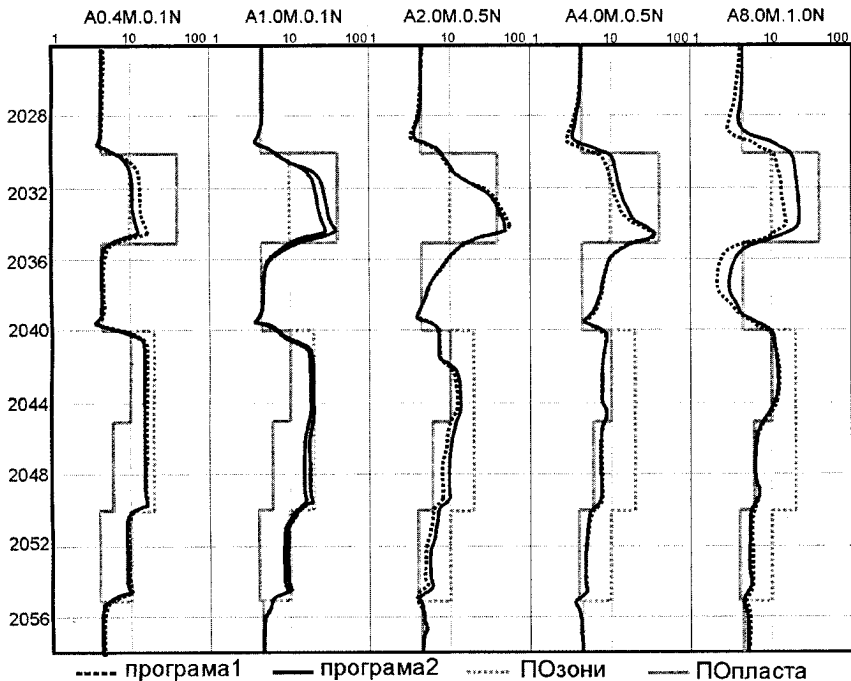


Рис. 4.10. Приклад порівняння розв'язання прямої 2D задачі програмами, розробленими і реалізованими різними авторами, для перерізу, що містить трьохшарові пласти ( $\rho_C = 2 \text{ Ом}\cdot\text{м}$ ;  $r_C = 0.1 \text{ м}$ )

струмового). Інші розбіжності є результатом наближеного характеру будь-якого числового розрахунку і в даному випадку об'єктивно відображають величини його реальної похибки. Наочну оцінку ступеня збіжності отриманих результатів ми залишаємо за читачем.

Наведені розрізи, як і розріз для порівняння результатів розв'язання прямої задачі ІК з результатами FemLab, будувались з типових моделей, що були розглянуті у попередньому пункті 4.2.

Зазначимо, що будь-яке тестування потрібно проводити коректно, щоби його результати не викликали сумніву.

Також треба пам'ятати, що головною перевіркою вірності алгоритму розв'язання прямої задачі є оцінка працездатності алгоритму розв'язання оберненої задачі, який його використовує.

Принаймні, оцінка результатів оберненої задачі у порівнянні з іншими даними геологічної інтерпретації та літологічного розчленування розрізів



дозволяє одразу виявляти очевидні помилки реалізації розв'язання прямої задачі.

## **Висновки до розділу I**

Наявність недоліків в існуючих алгоритмах розв'язання обернених задач або можливість підвищити їх ефективність спонукає створювати нові та удосконалювати існуючі.

Оскільки сучасне розв'язання оберненої задачі є ітераційним процесом, на кожному кроці якого використовується результат розв'язання прямої задачі, то перш ніж перейти до розгляду розв'язання обернених задач необхідно впевнитись в наявності точного способу отримання такого результату.

Наведені в розділі обґрунтування відповідних способів розв'язання прямої задачі ЕК та ІК, приклади їх використання та приклади їх тестування дозволяють дійти висновку, що необхідні, для подальшого розгляду обернених задач, засоби розв'язання прямих – створені.

---

---

# РОЗДІЛ II. ОБЕРНЕНІ ЗАДАЧІ

---

---

## Вступ до розділу II

Розділ присвячено оберненим задачам, тобто задачам встановлення значень геоелектричних параметрів моделі розрізу за даними каротажу.

У п'ятій главі дано загальний опис алгоритму розв'язання оберненої задачі. Описано два можливих алгоритми розв'язання: поплавковий і поточковий. Досліджено зв'язок вертикальних характеристик з довжиною зондів, що беруть участь в інверсії, та вплив свердловини на радіальні характеристики. Описано метод кривих зондування як спосіб дослідження радіальних характеристик комплексів електрометрії. Наведено приклади розв'язання оберненої задачі для тестового та практичного свердловинного матеріалу.

У шостій главі описано спосіб факторизації лінійної задачі ІК, проаналізовано спотворення результатів розв'язання оберненої задачі в околі границь пластів та вплив свердловини на результат розв'язку. Розглянуто питання впливу похибки каротажу на факторизацію оберненої задачі. Наведено приклади розв'язання оберненої задачі для тестового та практичного свердловинного матеріалу.

У сьомій главі наведено та проаналізовано результати спільного розв'язання оберненої задачі ЕК та ІК.

У восьмій главі розглянуто питання впливу похибки каротажу на розв'язання оберненої задачі, описано алгоритм дослідження характеристик просторової роздільної здатності комплексів електрометрії як метод визначення областей стійкості її розв'язання, запропоновано метод побудови областей еквівалентності.

# РОЗВ'ЯЗАННЯ ОБЕРНЕНОЇ ЗАДАЧІ ЕЛЕКТРИЧНОГО КАРОТАЖУ

## 5.1. Вертикальні характеристики електричного каротажу

Відповідь на основні питання щодо місцезнаходження та кількості корисного флюїду, можливої добової швидкості його видобутку полягає не у вимірюваних уявних величинах УО (або УП), а саме в значеннях геоелектричних параметрів моделі розрізу, що описує просторовий розподіл ПО (або ПП).

Саме тому геофізичними характеристиками апаратури слід вважати здатність конкретного алгоритму (і його реалізації) розв'язання оберненої задачі виділяти ті чи інші об'єкти, а також встановлювати їх геоелектричні параметри (із заданою точністю).

Отже, з точки зору ГДС кращою є не апаратура, що має кращу точність виміру, а та, для якої можливе більш точне розв'язання оберненої задачі.

Ефективність того чи іншого методу розв'язання оберненої задачі визначається вибором способу визначення даних виміру зондів для обраних параметрів середовища; вибором параметра «близькості» розрахованих показань зонда і реальних; вибором способу підбору параметрів моделі для обраного параметра "близькості".

Ці питання можна перефразувати відповідно як:

- вибір способу розв'язання прямої задачі (скінченні різниці, скінченні елементи, повні струми, напіваналітичне розв'язання тощо);
- вид функціонала, що буде мінімізуватись при вирішенні оберненої задачі (раніше цей пункт виглядав як «вибір наочно найближчої палетки», див. п. 1.3);
- спосіб ітераційного процесу розв'язання оберненої задачі.

Глава 4 дозволила зрозуміти сутність першого питання. Крім того, зазначимо, що в залежності від розв'язуваної задачі, а іноді й особистих вподобань дослідника питання вибору методу не має єдиної відповіді і останніми роками для розв'язання прямих задач ЕК і ІК широко застосовуються різні методи (Мартаков, Эпов, 1999; Ельцов та ін., 2000; Миронцов, 2012d; Глинских, Эпов, 2006).

Розглянемо два інші питання на прикладі ЕК.

Зазначимо, що будь-яка свердловинна електрометрія, ЕК в тому числі, надає досліднику якусь «усереднену» величину питомого опору чи провідності – УО чи УП. Так, основний результат ЕК – УО, а низькочастотного ІК – УП. Тому одна зі складових теорії та методології електрометрії свердловин – створення алгоритму (розв'язання оберненої задачі), що дозволяє за даними вимірювання відновлювати просторовий розподіл диференціальних фізичних величин – ПО чи ПП. Кількість геоелектричних параметрів, що встановлюються, не може перевищувати кількість вимірюваних величин, тому просторовий розподіл описується за допомогою моделі обмеженої кількості параметрів. Для підвищення деталізації дослідження розподілу ПО чи ПП необхідне збільшення кількості зондів, що мають різну глибину дослідження. Ця кількість має осмислене обмеження: знизу – необхідною кількістю невідомих в передбачуваній моделі інверсії; зверху – конструктивними, технічними та методичними особливостями.

У нашому випадку тришарової моделі середовища кількість невідомих параметрів моделі – 3 ( $\rho_D$ ,  $\rho_3$  та  $D/d$ ) і, отже, розв'язання оберненої задачі буде мати зміст тільки для комплексів електрометрії, що мають 3 і більше зондів.

У цій главі ми будемо розглядати так званий комплекс «БКЗ+БК», що складається із семи нефокусованих зондів апаратури БКЗ (A0.4M0.1N, A1.0M0.1N, A2.0M0.5N, A4.0M0.5N, N6.0M0.5A, A8.0M1.0N, N0.5M2.0A (обернений A2.0M0.5N)) та одного фокусованого трьохелектродного зонда бокового каротажа БК-3.

Згадаємо той факт (див. п. 4.2), що у випадку тришарової моделі середовища малопотужних пластів ми маємо принципово двовимірну задачу.

Для її розв'язання, взагалі кажучи, необхідно було би факторизувати задачу (тут і надалі під факторизацією ми будемо мати на увазі заміну однієї двовимірної задачі на дві одновимірні задачі): спочатку вирішити задачу по одній просторовій координаті, а потім розв'язати ряд одновимірних задач, розв'язок яких вже не залежить від першої координати. На практиці це мало би виглядати таким чином: спочатку розв'язується задача вздовж осі свердловини (вісь  $z$ ), а потім розв'язується одновимірна задача вздовж кожного окремого пласта при так званому «нопластовому» розв'язанні

(вважаючи, що сусідні пласти після реалізованої факторизації не впливають жодним чином на зв'язок даних каротажу проти цього пласту з його геоелектричними параметрами) чи вздовж прямої при так званому «поточковому» розв'язанні.

Але для нелінійних задач ЕК автору не відомі вдало реалізовані ефективні та точні методи факторизації, як і не відомі ефективні алгоритми розв'язання обернених задач, де б одночасно розв'язувалась задача по двох координатах (без факторизації).

Звичайно, відомі алгоритми, при яких знайдений попластовий розв'язок (в припущенні, що кожен пласт є нескінченно потужним і, отже, сусідні пласти не впливають на розв'язання його одновимірної задачі) поступово уточнюється, враховуючи вплив сусідніх пластів. Як правило, такий процес уточнення реалізується ітераційно. На першому кроці ітерації послідовно перебираються всі пласти і для кожного з них розв'язується обернена одновимірна задача, де змінними є тільки геоелектричні параметри цього пласта – параметри всіх інших пластів вважаються відомими і дорівнюють попередньо знайденому розв'язку задачі в припущенні нескінченної їх потужності. На другому кроці алгоритм повторюється, тільки параметри сусідніх пластів задаються вже як знайдені на попередньому кроці ітерації.

Процес продовжується доти, доки результат порівняння не задовольнить деякому критерію близькості. Як правило, йдеться про мінімізацію нев'язки між виміряними значеннями УО і значеннями УО для моделі, що підбирається.

Ми вже бачили (рис. 2.6-2.9 для ЕК та 3.17-3.20 для ІК), що в околі границь пластів результати каротажу зондів суттєво спотворюються.

Почнемо з того, що спробуємо оцінити, як саме такі граничні ефекти спотворюють розв'язання оберненої задачі. Для цього розв'яжемо обернену задачу для моделі розрізу, що відповідає рис. 2.6, тобто для випадку поодинокого пласта без проникнення потужністю 4 м,  $\rho_{II} = 10 \text{ Ом}\cdot\text{м}$ , ПО вміщуючих порід 1 Ом·м,  $\rho_C = 1 \text{ Ом}\cdot\text{м}$ . Фактично це три пласти, один поодинокий потужністю 4 м і  $\rho_{II} = 10 \text{ Ом}\cdot\text{м}$  і два напівнескінченні з  $\rho_{II} = 1 \text{ Ом}\cdot\text{м}$  кожен. Отже, ми спробуємо без використання додаткової інформації за кривими зондів БКЗ та БК-3, представленими на рис. 2.6, отримати криві  $\rho_{II}$  та  $\rho_3$ , що збігаються між собою і тотожно дорівнюють кривій  $R_{\text{ПЛАСТА}}$  на третій діаграмі рисунку 2.6. Іншими словами, ми повинні точно встановити параметри трьох пластів без проникнення (одного поодинокого і двох напівнескінченних). Зрозуміло, що за отриманими кривими повинні однозначно визначатись і границі пластів.

Починаючи розв'язувати обернену задачу, ми повинні визначитись, яким саме шляхом слід рушити: поточковим чи попластовим?

В обох варіантах кінцевим результатом повинні стати відомі геоелектричні параметри кожного пласта (окрім  $\rho_D$  та  $\rho_3$  у загальному випадку, ще і діаметр зони  $D/d$  для пластів з проникненням), але отримати значення цих параметрів можна двома різними шляхами.

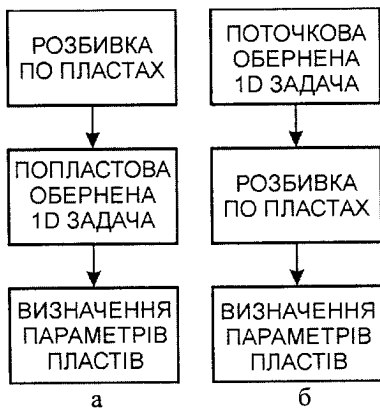
У попластовому варіанті (див. рис. 5.1) ми за деякими ознаками розбиваємо інтервал розв'язання на окремі пласти і для кожного з таких пластів розв'язуємо обернену одновимірну задачу, вважаючи, що сусідні пласти не впливають на результат її розв'язання (іншими словами, вважаємо, що цей пласт має нескінченну потужність).

Постає питання, яким чином вибрати для подальшого розв'язку оберненої задачі по одному значенню (відліку) для кожного зонда для кожного пласта, якщо граничні ефекти значні?

Навіть для випадку моделі, що зображена на рис. 2.6, враховуючи складну форму кривих, це буде не зовсім тривіальне завдання. Вже не кажучи про те, що якщо розстановка границь буде відбуватись автоматично в точках, де дорівнює нулю друга похідна не самого малого зонду (A0.4M0.1N), а самого великого (A8.0M1.0N), то у нас з'являться ще додаткові пласти на інтервалах 2079-2074 м, 2068-2070 м. Отже, ми замість трьох пластів отримаємо п'ять, що вже є не тільки кількісно невірним результатом, але і якісно невірним (якщо опори цих пластів будуть значно відрізнятись від трьох шуканих). Звичайно, можна достатньо точно розставити границі для цієї моделі за кривою БК-3, однак все одно значення опорів визначених трьох пластів будуть спотворені граничними ефектами.

Постає питання: якщо ця проблема виникла одразу при розгляді найпростішої двовимірної моделі поодинокого пласта, то що, коли йтиметься про складніші моделі?

Для симетричних і фокусованих зондів, як правило, і це виявляється адекватним, для відліків (так називають значення, які обирають для кожного



**Рис. 5.1.** Послідовність дій при розв'язанні 1D оберненої задачі ЕК:

*a* – попластовий варіант,  
*б* – поточковий варіант

зонда) обирають значення в середині пласта чи усереднене значення центральної частини пласта (пор. п.1.3). Для визначення положення границі добре працює спосіб, заснований на аналізі другої похідної кривої УО (точки, де друга похідна дорівнює нулеві, є підозрілими на наявність границі). Але для нефокусованих градієнт-зондів питання вибору відліків та границь пластів майже неможливо формалізувати. На практиці ця проблема визначається просто: в усіх відомих автору програмах інтерпретації передбачена можливість ручного редагування положення границь та значень відліків інтерпретатором. Це допомагає виключити явно хибні об'єкти на досліджуваному інтервалі, але кінцевий результат виявляється залежним від компетенції та фаховості інтерпретатора.

Розбивка на пласти може відбуватись не тільки за дослідженням другої похідної каротажної кривої одного із зондів комплексу ЕК (як правило, обирають найменший і бажано симетричний зонд) – для цього за наявності можна долучати допоміжні методи (наприклад, ПС чи МБК).

У поточковому варіанті ми вважаємо, що дані каротажу в кожній точці відповідають даним каротажу, отриманим в пласті нескінченної потужності, і для цих даних розв'язуємо одновимірну обернену задачу. Після розв'язання оберненої задачі вже по кривій  $\rho_{II}$  ми розставляємо границі (розбиваємо досліджуваний інтервал на пласти) і для кожного пласта визначаємо по одному значенню  $\rho_{II}$ ,  $\rho_3$  та  $D/d$ .

При останній дії ми стикаємось з тією ж проблемою граничних ефектів, що і при попластовому алгоритмі, тобто все одно нам доводиться знімати відліки для кривих  $\rho_{II}$ ,  $\rho_3$  та  $D/d$ , що можуть мати непросту форму слідом за кривими виміряних УО.

У сучасних програмах інтерпретації передбачена можливість редагування інтерпретатором в ручному режимі значень відліків і для кривих  $\rho_{II}$ ,  $\rho_3$  та  $D/d$  і, отже, кінцевий результат для поточкового варіанту розв'язання оберненої задачі також виявляється суттєво залежним від кваліфікації інтерпретатора.

Будемо розглядати поточкове розв'язання в припущенні, що на дані в кожній точці не впливають значення ПО в сусідніх по вертикалі точках, тобто значення в кожній точці відповідає випадку пласта нескінченної потужності, і ми, для отриманих значень УО комплексу, можемо для кожного положення зондів БКЗ+БК у свердловині розв'язувати одновимірну задачу.

В якості критерію близькості знайденого розв'язку із шуканим істинним значенням можна розглядати мінімізацію функціонала:

$$F(\rho_1^T, \dots, \rho_n^T) = \frac{1}{n} \sqrt{\sum_{i=1}^n \left( \frac{\rho_i^T - \rho_i^P}{\rho_i^T} \right)^2}, \quad (5.1.1)$$

де  $n$  – кількість зондів апаратури;  $\rho_i^T$  – розраховані значення УО для моделі, що розглядається;  $\rho_i^P$  – фактично отримані значення УО.

Можливі і деякі варіації запису функціонала, який буде мінімізуватись в процесі розв'язання оберненої задачі. Наприклад, у вигляді (Глинских, Эпов, 2006):

$$F(\rho_1^T, \dots, \rho_n^T) = \frac{1}{n} \sqrt{\sum_{i=1}^n \left( \frac{\rho_i^T - \rho_i^P}{\delta_i \rho_i^T} \right)^2}, \quad (5.1.2)$$

де  $\delta_i$  – відносна похибка  $i$ -го зонда.

Або (Кнеллер, Потапов, 2010):

$$F(\rho_1^T, \dots, \rho_n^T) = \frac{1}{n} \sqrt{\sum_{i=1}^n \left( \frac{\rho_i^T - \rho_i^P}{\delta_i \rho_i^T + \chi_i} \right)^2}, \quad (5.1.3)$$

де  $\chi_i$  – абсолютна похибка  $i$ -го зонда.

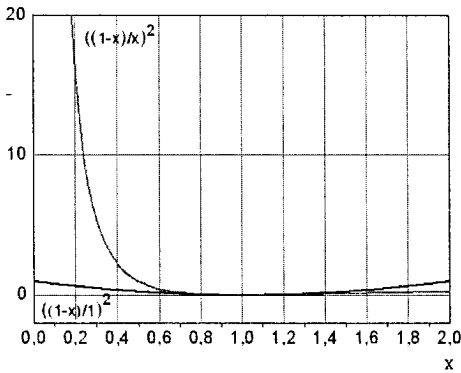
Ми будемо в цій і наступних главах розглядати функціонал виду:

$$F(\rho_1^T, \dots, \rho_n^T) = \sqrt{\sum_{i=1}^n K_i \left( \frac{\rho_i^T - \rho_i^P}{\rho_i^T} \right)^2}, \quad (5.1.4)$$

де  $K_i$  – вагові коефіцієнти кожного зонда комплексу, які можуть змінюватись інтерпретатором.

Зазначимо одразу, що при обчисленні функціоналів (5.1.1), (5.1.2), (5.1.3), (5.1.4) у знаменнику можна брати як значення  $\rho_i^P$ , так і  $\rho_i^T$ . Значення  $\rho_i^T$ , при яких досягається мінімум, від цього не залежать. Але від цього може





**Рис. 5.2.** Приклади форми кривих виразу, що мінімізується в залежності від використання  $\rho_i^P$  і  $\rho_i^T$  у знаменнику  $F(\rho_1^T, \dots, \rho_n^T)$

залежати швидкість мінімізації самого функціонала, що може бути важливим при розв'язанні реальних обернених задач. Різна швидкість мінімізації (в залежності від обраного методу) пояснюється різною формою залежності виразу під знаком кореня і тим, що у знаменнику – аргумент чи постійне число (на рис. 5.2 показано обидва варіанти).

Покладемо спочатку для всіх зондів  $K_i = 1$ .

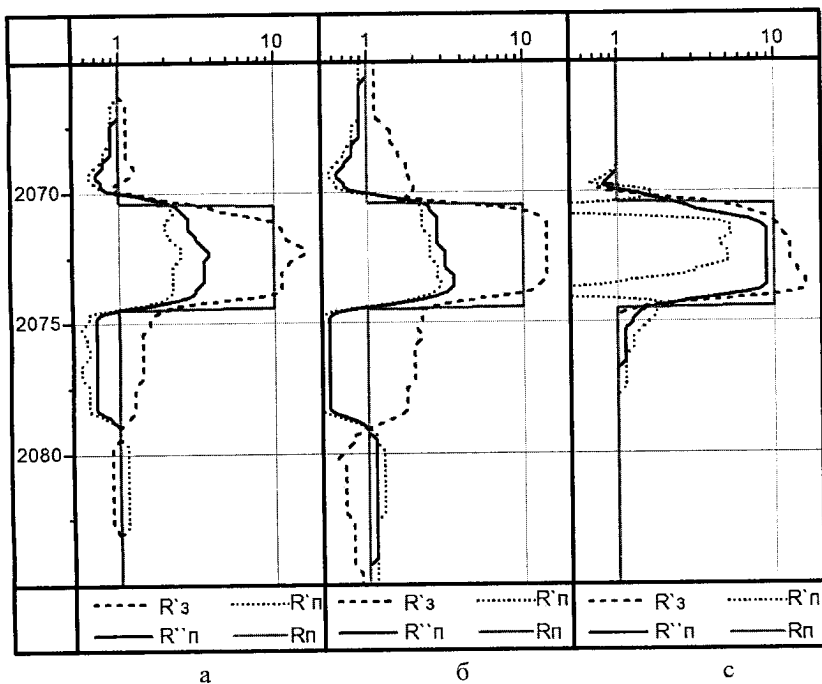
На рис. 5.3.a показано результати такого розв'язання. Результат першого розв'язання:  $R''_{\Pi}$ ,  $R'_3$  – відповідно ПО пласта та ПО зони. Тобто *a priori* при

розв'язанні ми вважали, що не знаємо, чи є проникнення на досліджуваному інтервалі, і намагались встановити його параметри так, ніби воно є. Навпаки,  $R''_{\Pi}$  – отримане ПО пласта при іншому варіанті розв'язання оберненої задачі у припущенні, що зони немає, тобто ПО вздовж пласта не змінюється. Крива  $R_{\Pi}$  – шукане значення ПО, і в ідеальному випадку точного розв'язання для цієї моделі мало би виконуватись:  $R''_{\Pi} = R'_3 = R''_{\Pi} = R_{\Pi}$ .

Легко побачити, що у разі припущення про присутність зони проникнення її ПО краще збігається із шуканим значенням ПО пласта, ніж  $R''_{\Pi}$  чи  $R''_{\Pi}$ . Отже, перше враження, яке може виникнути, що комплекс БКЗ+БК "відчуває" тільки ближню зону пласта. Тобто його глибинність складає величину меншу, ніж  $D/d$ , і до зміни ПО більш віддаленої частини пласта цей комплекс "не чутливий".

Для того щоби перевірити це припущення, можна посилити вплив великих зондів на результат розв'язання оберненої задачі і зменшити вплив малих. Для цього якраз і стануть в нагоді вагові коефіцієнти в (5.1.4).

На рис. 5.3.б показано результати розв'язання двох обернених задач (аналогічно рис. 5.3.a: одна – у припущенні наявності проникнення (результат розв'язання –  $R''_{\Pi}$ ,  $R'_3$ ) на всьому інтервалі й інша – у припущенні його відсутності на всьому інтервалі (результат розв'язання –  $R''_{\Pi}$ ) при виключенні з розв'язання зондів A0.4M0.1N, A1.0M0.1N, A2.0M0.5N, N0.5M2.0A.



**Рис. 5.3.** Результат розв'язання оберненої задачі БКЗ+БК для пласта потужністю 4 м ( $R'z$  – знайдений ПО зони,  $R''п$  – ПО пласта,  $R''п$  – ПО пласта при відсутній зоні,  $Rп$  – шукане значення ПО пласта):

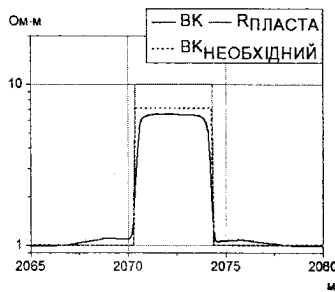
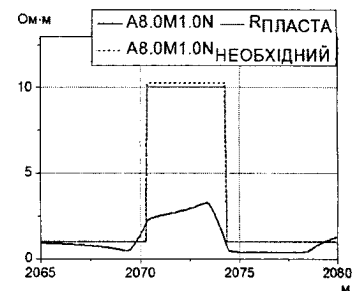
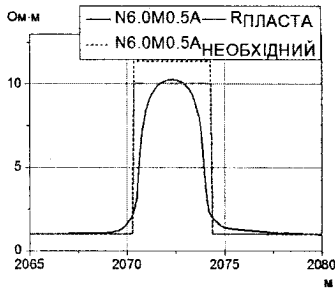
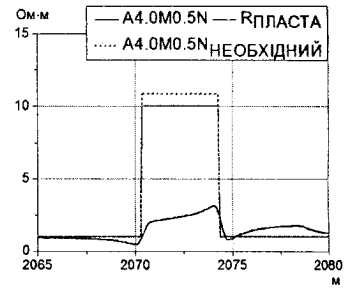
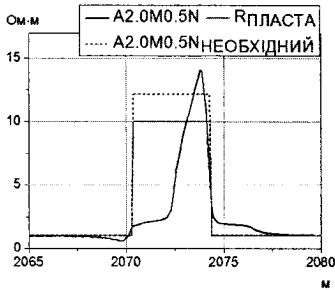
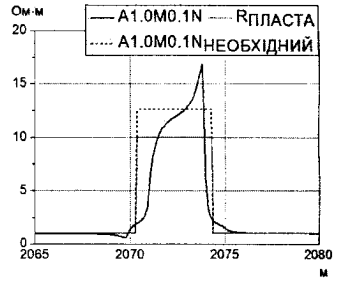
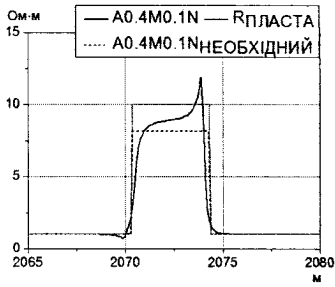
*a.* – всі  $K = 1$ ;

*б.* –  $K_{A0.4M0.1N} = 0$ ,  $K_{A1.0M0.1N} = 0$ ,  $K_{A2.0M0.5N} = 0$ ,  $K_{N0.5M2.0A} = 0$ ;

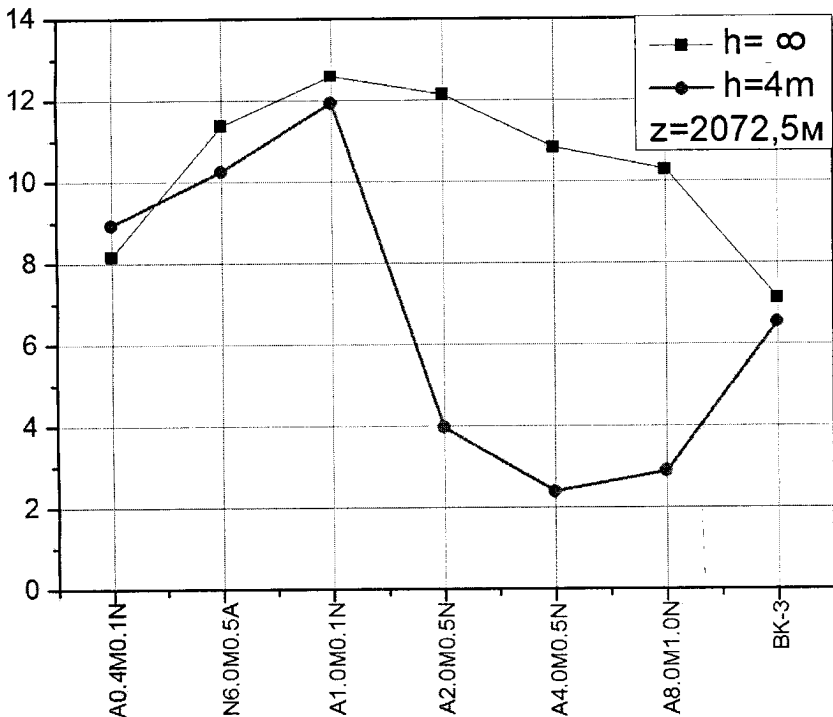
*в.* –  $K_{A2.0M0.5N} = 0$ ,  $K_{A4.0M0.5N} = 0$ ,  $K_{A8.0M1.0N} = 0$ ,  $K_{N0.5M2.0A} = 0$

Як можна побачити, результат не покращився.

Тоді ми спробуємо інший підхід. За допомогою розв'язання прямої задачі було обчислене (рис. 5.4) необхідне значення УО для кожного зонда, використовуючи яке при мінімізації (5.1.4), тобто при розв'язанні оберненої задачі, ми би отримали бажаний і вірний результат:  $R''п = R'z = R''п = Rп$ . Порівняємо отримані значення УО із значеннями УО в середині поодинокого пласта (рис. 5.5).



**Рис. 5.4.** Порівняння каротажних кривих із значеннями, необхідними для точного розв'язання оберненої задачі



**Рис. 5.5.** Порівняння кривих зондування для пласта нескінченної потужності і значення УО в середині пласта потужності 4 м ( $\rho_{\text{п}} = 10 \text{ Ом}\cdot\text{м}$ ,  $\rho_{\text{с}} = 1 \text{ Ом}\cdot\text{м}$ )

Легко бачити, що найбільша розбіжність виявляється у середніх і великих градієнт-зондів, а саме у зондів A2.0M0.5N (та N0.5M2.0A), A4.0M0.5N, A8.0M1.0N. Виключимо їх дані із початкових умов розв'язання оберненої задачі (поклавши відповідні  $K_i = 0$ ). Результат зображено на рис. 5.3.в.

У випадку припущення наявності проникнення на всьому інтервалі в цілому результат виявився також негативним. Однак на інтервалі 2071.5-2073.0 криві  $R'_{\text{п}}$  та  $R'_{\text{з}}$  починають наближатись одна до одної. Аналізуючи криві УО зондів на цьому інтервалі (рис. 5.4.), ми якраз і бачимо, що з усіх градієнт-зондів саме УО зондів A0.4M0.1N, A1.0M0.1N на цьому інтервалі наближаються до шуканого.

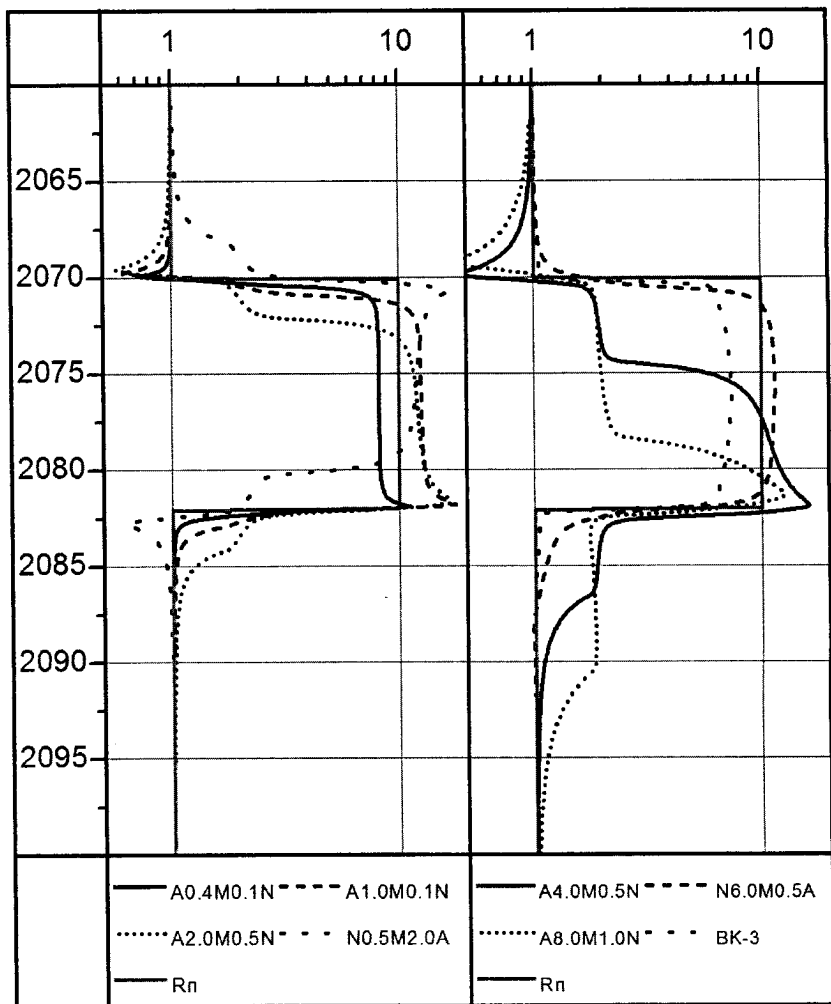
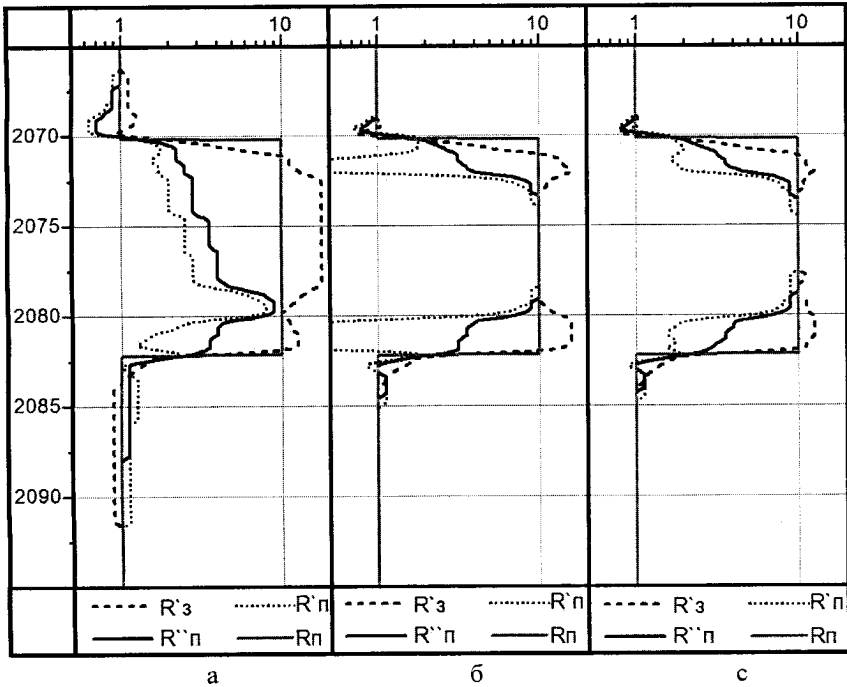


Рис. 5.6. Каротажні діаграми комплексу БКЗ+БК для поодинокого пласта потужністю 12 м ( $\rho_{II} = 10 \text{ Ом}\cdot\text{м}$ ,  $\rho_C = 1 \text{ Ом}\cdot\text{м}$ )



**Рис. 5.7.** Результат розв'язання оберненої задачі БКЗ+БК для пласта потужністю 12 м ( $R'z$  – знайдений ПО зони,  $R''z$  – ПО пласта,  $R'п$  – ПО пласта при відсутній зоні,  $R''п$  – шукане значення ПО пласта):  
 а. – всі  $K = 1$ ; б. –  $K_{A4.0M0.5N} = 0$ ,  $K_{A8.0M1.0N} = 0$ ;  
 в. –  $K_{A4.0M0.5N} = 0$ ,  $K_{A8.0M1.0N} = 0$  (і окремо  $K_{7\phi 1.6} = 1$ )

Більше того, результат розв'язання оберненої задачі у припущенні відсутності проникнення на всьому інтервалі (крива  $R''п$ ) майже точно повторює форму кривої шуканого опору  $Rп$ , максимально наближаючись до його значень в середині пласта (рис. 5.3.с).

Отже, можна зробити висновок: величина ПО  $\rhoп = 10$  Ом·м поодинокого пласта потужністю 4 м, при ПО свердловини  $\rhoс = 1$  Ом·м і ПО вміщуючих пластів 1 Ом·м визначається в процесі розв'язання оберненої задачі у припущенні відсутності проникнення з похибкою меншою 10% (для

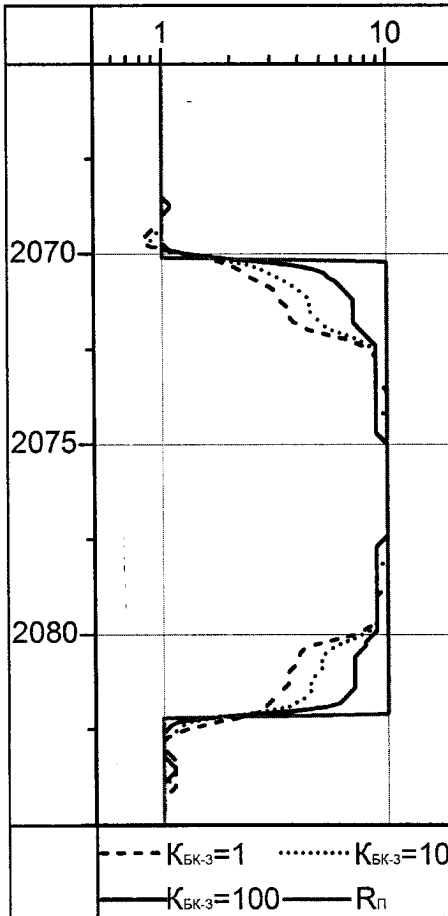


Рис. 5.8. ПО  $R''_п$  в припущенні відсутності проникнення: відбиття границі пласта для різних вагових коефіцієнтів зонду БК-3

всьому інтервалі є проникнення (результат розв'язання –  $R''_п$ ,  $R'_3$ ); інша – у припущенні його відсутності на всьому інтервалі (результат розв'язання –  $R''_п$ ) для різних наборів зондів (рис. 5.7).

значень  $R''_п$  в інтервалі 2071.5–2073.5), якщо в якості комплексу зондів обрати зонди: нефокусовані А0.4М0.1N, А1.0М0.1N, N6.0М0.5А та фокусований БК-3.

Отримані та наведені результати дають підставу зробити висновок, що спотворення результатів у розв'язанні оберненої задачі для цієї моделі є наслідком не незадовільної радіальної (вздовж пласта) просторової роздільної здатності комплексу БК3+БК, а зумовлене виключно граничними ефектами, тобто недостатньою їхньою вертикальною роздільною здатністю (особливо великих та середніх градієнт-зондів).

Щоби підтвердити або спростувати цей висновок, розглянемо таку саму модель поодинокого пласта, але збільшимо його потужність з 4 метрів до 12.

На рис. 5.6. зображено діаграми УО зондів комплексу в порівнянні із заданим шуканим ПО породи без проникнення –  $R_п$ .

Аналогічно з попередньою моделлю розв'яжемо шість різних обернених задач по дві (одна – у припущенні, що на

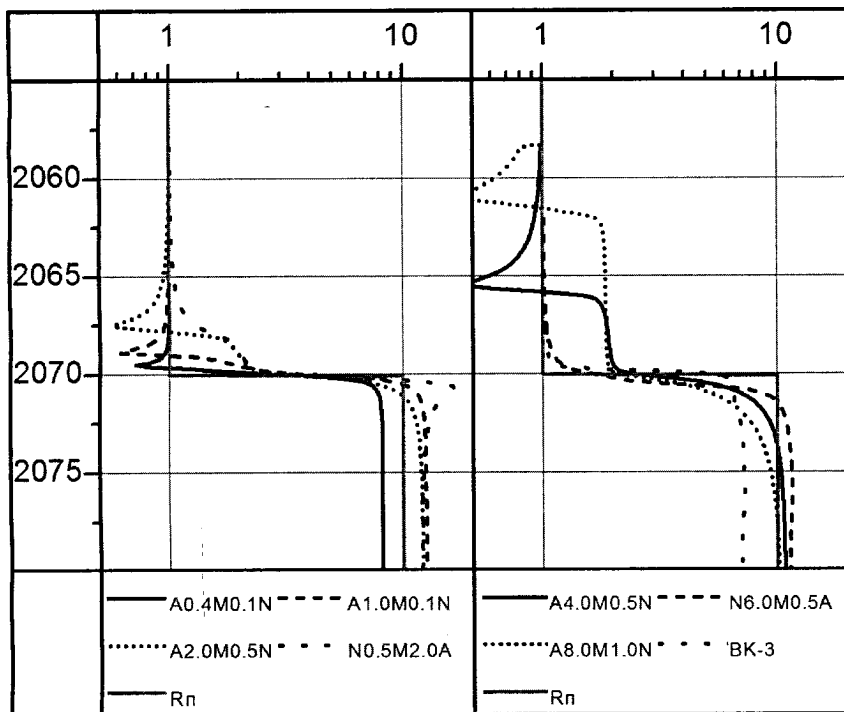


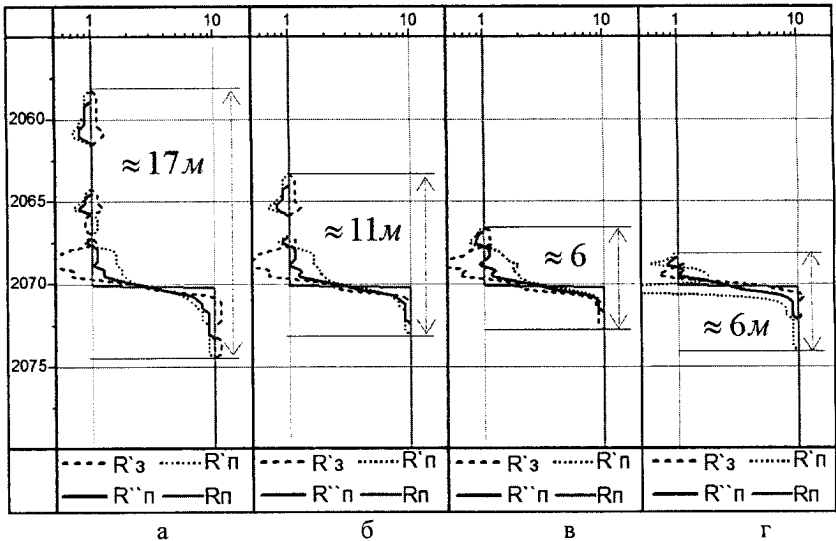
Рис. 5.9. Каротажні діаграми комплексу БКЗ+БК для границі двох нескінченних пластів  $\rho_{II} = 10 \text{ Ом}\cdot\text{м}$  та  $\rho_{II} = 1 \text{ Ом}\cdot\text{м}$  ( $\rho_C = 1 \text{ Ом}\cdot\text{м}$ )

Для цієї моделі середовища результати, у порівнянні з попередньою моделлю, не тільки кардинально змінились, але вже дозволяють говорити про кількісну оцінку вертикальної роздільної здатності комплексу БКЗ+БК.

У випадку участі даних всіх зондів комплексу (рис. 5.7.а) у якості відомих при розв'язанні оберненої задачі – результат знову є кількісно і якісно невірним. Так само негативний результат виявився і при виключенні з початкових умов оберненої задачі малих градієнт-зондів А0.4М0.1N, А1.0М0.1N, А2.0М0.5N, N0.5М2.0А.

А от результат, коли в якості початкових умов ми обрали дані УО малих та середніх градієнт-зондів А0.4М0.1N, А1.0М0.1N, А2.0М0.5N, N0.5М2.0А разом із потенціал-зондом N6.0М0.5А та фокусованим БК-3 (рис. 5.7.б), дозволяє говорити про якісне і кількісне розв'язання оберненої задачі (тобто нарешті виконується рівність  $R'_{II} = R'_3 = R''_{II} = R_{II}$ ) на всьому





**Рис. 5.10.** Результат розв'язання оберненої задачі БКЗ+БК для границі двох нескінченних пластів  $\rho_{II} = 10 \text{ Ом}\cdot\text{м}$  та  $\rho_{II} = 1 \text{ Ом}\cdot\text{м}$  ( $R'z$  – знайдений ПО зони,  $R'п$  – ПО пласта,  $R''п$  – ПО пласта при відсутній зоні,  $Rп$  – шукане значення ПО пласта).

- а. – всі  $K = 1$ ; б. –  $K_{A8.0M1.0N} = 0$ ; в. –  $K_{A4.0M0.5N} = 0$ ,  $K_{A8.0M1.0N} = 0$ ;  
 г. –  $K_{A2.0M0.5N} = 0$ ,  $K_{A4.0M0.5N} = 0$ ,  $K_{A8.0M1.0N} = 0$ ,  $K_{N0.5M2.0A} = 0$

інтервалі розрізу за виключенням невеликих інтервалів в околах горизонтальних границь пластів (2068-2074 м та 2078-2085). Тобто можна оцінити величину інтервалів спотворення розв'язку оберненої задачі для цих зондів і цієї моделі у 4-7 м (в залежності від того, яку похибку визначення ПО вважати спотворенням).

Одразу відмітимо цікавий факт, до якого будемо неодноразово звертатись надалі, а саме як змінюється результат розв'язання оберненої задачі, якщо до зондів ЕК додати зонд ІК.

Так, ми додали до зондів А0.4М0.1N, А1.0М0.1N, А2.0М0.5N, N0.5M2.0A, N6.0M0.5A та БК-3 зонд ІК 7Ф1.6 (див. рис. 5.7.в). Порівнюючи отримані результати з попередніми (рис. 5.7.б), які відрізняються тільки наявністю чи відсутністю даних цього зонда в заданих граничних умовах оберненої задачі, ми бачимо, як цей зонд «виправляє» значення ПО зони (криві  $R'z$ ), саме в інтервалах навколо горизонтальних границь пластів.

Використання для мінімізації функціонала у вигляді (5.1.4), тобто з ваговими коефіцієнтами для різних зондів, дозволяє не тільки додавати чи виключати з граничних умов оберненої задачі ті чи інші зонди, але і досліджувати вплив кожного окремо на кінцевий результат.

Так, на рис. 5.8 наведено результат розв'язання оберненої задачі для нашої моделі поодинокого пласта потужністю 12 м для зондів А0.4М0.1N, А1.0М0.1N, А2.0М0.5N, N0.5M2.0A, N6.0M0.5A, БК-3 та ІК 7Ф1.6, якщо змінюється ваговий коефіцієнт саме зонда БК-3 (коефіцієнти всіх інших залишаються рівними одиниці).

Як ми бачимо, збільшення «ваги» фокусованого зонда БК-3 при розв'язанні оберненої задачі значно покращує вертикальну роздільну здатність комплексу в цілому (в припущенні відсутності проникнення на досліджуваному інтервалі).

Взагалі кажучи, для того щоби кількісно оцінити вертикальну просторову роздільну здатність того чи іншого комплексу, здається логічним досліджувати властивості розв'язання оберненої задачі в інтервалі, що містить горизонтальну границю двох напівнескінченних пластів.

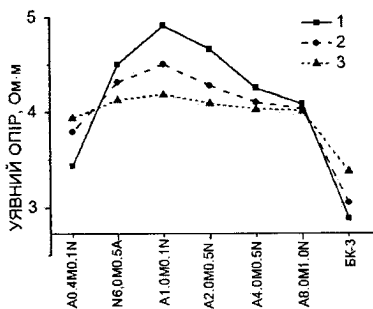
Саме така модель здається ідеальною для дослідження величини інтервалу, на якому спотворюється результат розв'язання оберненої задачі внаслідок граничних ефектів.

Для отриманих каротажних кривих (рис. 5.9.) ми розв'язали вісім різних обернених задач по дві (одна – у припущенні, що на всьому інтервалі є проникнення (результат розв'язання –  $R'_{\Pi}$ ,  $R'_3$ ); інша – у припущенні його відсутності на всьому інтервалі (результат розв'язання –  $R''_{\Pi}$ )) для різних наборів зондів комплексу (рис. 5.10).

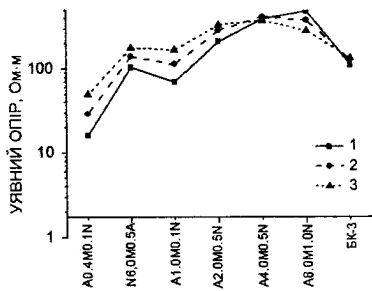
Наведені результати підтверджують висновок, що більші зонди спотворюють результат розв'язання оберненої задачі на більших інтервалах, отже, вибір комплексу зондів ЕК повинен відбуватись з міркувань очікуваних потужностей потенційно важливих для дослідження пластів на інтервалі.

## **5.2. Радіальні характеристики електричного каротажу**

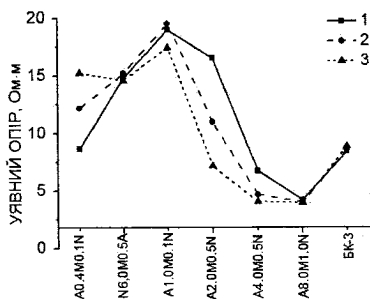
Під радіальними характеристиками ЕК розуміють можливість максимально точно встановлювати радіальний розподіл ПО вздовж пласта. Радіальна чутливість методу ЕК залежить, окрім іншого, і від моделі самого пласта, так при підвищуючому проникненні ( $\rho_z > \rho_{\Pi}$ ) чутливість методу до визначення  $\rho_{\Pi}$  буде тим нижчою порівняно із визначенням  $\rho_z$ , чим сильніше виконується нерівність у дужках.



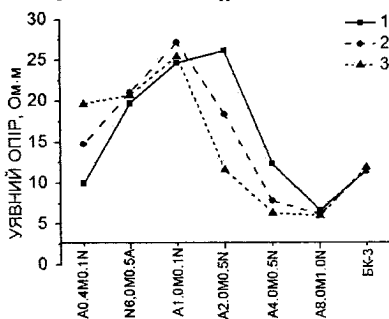
**Рис. 5.11.** Криві зондування у глинах без проникнення,  $\rho_{II} = 4 \text{ Ом}\cdot\text{м}$



**Рис. 5.12.** Криві зондування в ущільненому високоомному пласті без проникнення,  $\rho_{II} = 200 \text{ Ом}\cdot\text{м}$



**Рис. 5.13.** Криві зондування у водонасиченому колекторі з підвищуючим проникненням:  $\rho_{3II} = 20 \text{ Ом}\cdot\text{м}$ ,  $D/d = 6$ ,  $\rho_{II} = 4 \text{ Ом}\cdot\text{м}$



**Рис. 5.14.** Криві зондування у нафтонасиченому колекторі з підвищуючим проникненням:  $\rho_{3II} = 30 \text{ Ом}\cdot\text{м}$ ,  $D/d = 5$ ,  $\rho_{II} = 6 \text{ Ом}\cdot\text{м}$

Для оцінки радіальної чутливості використовують метод кривих зондувань (Технологія ..., 2000) для пластів достатньої потужності, на виміри у яких слабо впливають або не впливають зовсім вміщуючі пласти. У цьому пункті ми будемо розглядати саме таку ситуацію, і тому для розрахунків використовувались циліндрично-шарові моделі (рис. 4.2.6).

В якості пластів будемо розглядати описані моделі у главі 4 (п. 4.2), дещо розширивши можливі варіанти типу проникнення: ми побудуємо криві зондування для трьох різних значень ПО бурового розчину, що дозволить наочно продемонструвати вплив свердловини на радіальні характеристики досліджуваних комплексів.

В усіх випадках:  $d = 0.216$  м; шифр кривих 1 –  $\rho_C = 0.5$  Ом·м; 2 –  $\rho_C = 1$  Ом·м; 3 –  $\rho_C = 2$  Ом·м.

**Глинистий низькоомний пласт, розкритий свердловиною (рис. 5.11).**

Зона проникнення мала або відсутня. При  $\rho_C = 2$  Ом·м УО майже всіх нефокусованих зондів дорівнює ПО пласта. Зі зниженням ПО бурового розчину ПО зростає, на кривій зондування проявляється «екстремум» для метрового зонда. УО за БК нижче ПО пласта на 20-30%.

**Ущільнений високоомний пласт малої проникливості, розкритий свердловиною (рис. 5.12).**

Зона проникнення мала або відсутня. Вплив свердловини проявляється майже для всіх зондів (найближчі значення до ПО пласта мають потенціал-зонд і метровий градієнт-зонд та зонд БК). На УО БК ПО свердловини майже не впливає і воно добре збігається з ПО пласта.

**Водонасичений колектор з підвищуючим проникненням, розкритий свердловиною (рис. 5.13).**

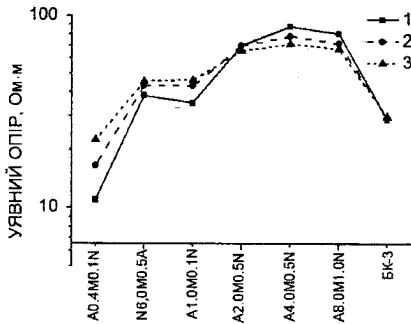
УО зондів з метрового по восьмиметровий відображають характер проникнення, причому метровий зонд відображає ПО зони проникнення. На УО півметрового градієнт-зонда і потенціал-зонда значно впливає свердловина. УО БК типово спотворює монотонний характер кривої зондування. Значення УО восьмиметрового зонда близькі до ПО пласта. Зменшення ПО бурового розчину призводить до явища уявного збільшення діаметра зони проникнення.

**Нафтонасичений колектор з підвищуючим проникненням, розкритий свердловиною (рис. 5.14).**

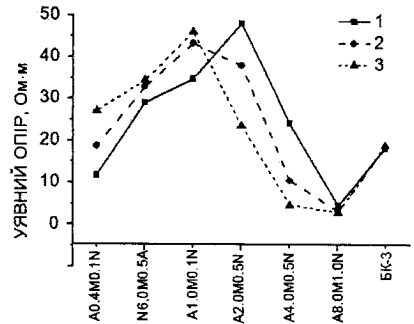
Як і в попередньому випадку УО зондів з метрового по восьмиметровий відображають характер проникнення (з двохметрового при малому ПО бурового розчину), при цьому не дотягуючи до ПО зони 15-18%. Так само, як і для водонасиченого колектора з підвищуючим проникненням, значення УО восьмиметрового зонда близькі до ПО пласта, а зменшення ПО бурового розчину призводить до явища уявного збільшення діаметра зони проникнення. Для точного відокремлення цих двох випадків потрібно порівняння абсолютних значень ПО зони та пласта та використання додаткової геологічної інформації.

**Газонасичений колектор з понижуючим проникненням, розкритий свердловиною (рис. 5.15).**

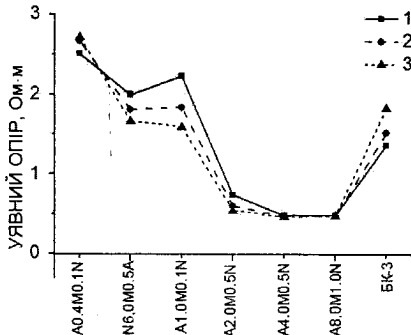
За формою криві нагадують криві зондування в ущільненому високоомному пласті без проникнення. Для точного відокремлення цих двох



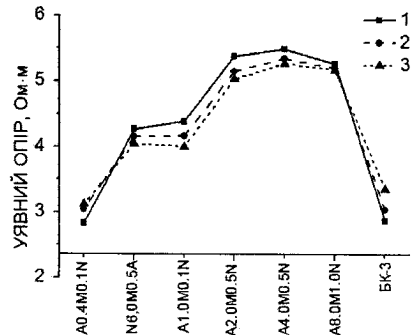
**Рис. 5.15.** Криві зондування у газонасиченому колекторі з понижуючим проникненням:  $\rho_{ЗП} = 30 \text{ Ом}\cdot\text{м}$ ,  $D/d = 7$ ,  $\rho_{П} = 60 \text{ Ом}\cdot\text{м}$



**Рис. 5.16.** Криві зондування у колекторі залишкового нафтонасичення:  $\rho_{ЗП} = 50 \text{ Ом}\cdot\text{м}$ ,  $D/d = 6$ ,  $\rho_{П} = 3 \text{ Ом}\cdot\text{м}$



**Рис. 5.17.** Криві зондування у водонасиченому колекторі аномально низького опору з підвищуючим проникненням:  $\rho_{ЗП} = 3 \text{ Ом}\cdot\text{м}$ ,  $D/d = 6$ ,  $\rho_{П} = 0.5 \text{ Ом}\cdot\text{м}$



**Рис. 5.18.** Криві зондування у нафтонасиченому колекторі аномально низького опору з підвищуючим проникненням:  $\rho_{ЗП} = 3 \text{ Ом}\cdot\text{м}$ ,  $D/d = 6$ ,  $\rho_{П} = 5 \text{ Ом}\cdot\text{м}$

випадків потрібно порівняння абсолютних значень ПО зони та пласта та використання додаткової геологічної інформації. Зонд бокового каротажу описує ПО зони, зонди з двохметрового по восьмиметровий – ПО пласта.

**Колектор залишкового нафтонасичення, розкритий свердловиною (рис. 5.16).**

За формою криві нагадують криві зондування у водонасиченому колекторі та у нафтонасиченому колекторі з підвищуючим проникненням,

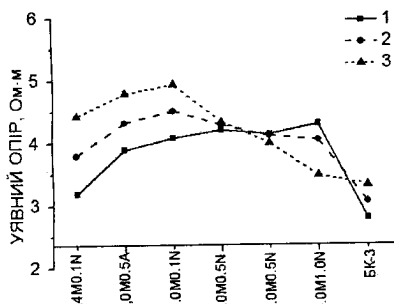


Рис. 5.19. Криві зондування в анізотропних глинах без проникнення  $\rho_r = 4 \text{ Ом}\cdot\text{м}$

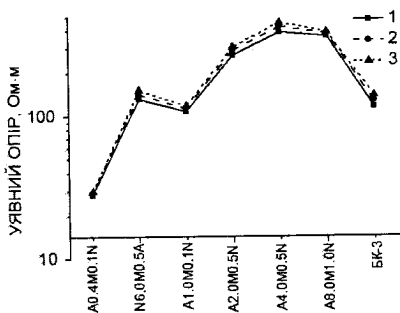


Рис. 5.20. Криві зондування в ущільненому високоомному пласті без проникнення  $\rho_r = 200 \text{ Ом}\cdot\text{м}$

але за абсолютними показниками вони є значно більшими. Метровий зонд відображає ПО зони. Так само зменшення ПО бурового розчину призводить до явища уявного збільшення діаметра зони проникнення. Для точного відокремлення цього випадку від двох згадуваних потрібно порівняння абсолютних значень ПО зони та пласта та використання додаткової геологічної інформації.

**Водонасичений колектор аномально низького опору з підвищуючим проникненням, розкритий свердловиною (рис. 5.17).**

Всі нефокусовані зонди показують явно підвищуюче проникнення, а абсолютне значення їх УО вказує на тип колектору. Зонди від двохметрового по восьмиметровий показують ПО пласта. Значення БК близькі до значень потенціал-зонда та метрового градієнт-зонда.

**Нафтонасичений колектор аномально низького опору з понижуючим проникненням, розкритий свердловиною (рис. 5.18).**

Всі нефокусовані зонди показують явно понижуюче проникнення, а абсолютне значення їх УО вказує на тип колектору. Зонди від двохметрового по восьмиметровий показують ПО пласта. Значення БК близькі до значень потенціал-зонда та метрового градієнт-зонда та показують ПО зони.

Іноді трапляється ситуація, коли криві зондування ніби у загальних рисах нагадують тип кривої для визначеної моделі пласта і інша наявна інформація вказує на саме цю модель, але повного співпадіння немає, навіть коли виявляється, що модель вказана вірно. До цього може призводити явище анізотропії і мікроанізотропії зокрема, які ми тут послідовно розглядати не будемо. Хоча порядок їх розгляду не викликає технічних проблем і виглядає так само, як і у випадку відсутності анізотропії, з тією різницею, що у нас виникає додатковий параметр – параметр анізотропії.

Так, на рис. 5.19 і 5.20 наведено криві для двох моделей пласта (ПО свердловини  $\rho_C = 1 \text{ Ом}\cdot\text{м}$ ; шифр кривих: 1 – а  $\frac{\rho_z}{\rho_r} = 0.5$ ; 2 –  $\frac{\rho_z}{\rho_r} = 1$ ; 3 –  $\frac{\rho_z}{\rho_r} = 2$  (де  $\rho_z$  – вертикальний,  $\rho_r$  – радіальний УО породи, розкритої свердловиною, пор. див. п. 3.2)).

### 5.3. Розв'язання оберненої задачі БКЗ+БК

Розглянемо тепер приклад розв'язання оберненої задачі БКЗ+БК, тобто оберненої задачі для апаратури, що складається з набору таких зондів: А0.4М0.1N, А1.0М0.1N, А2.0М0.5N, N6.0М0.5А, А4.0М0.5N, А8.0М.0N, БК-3.

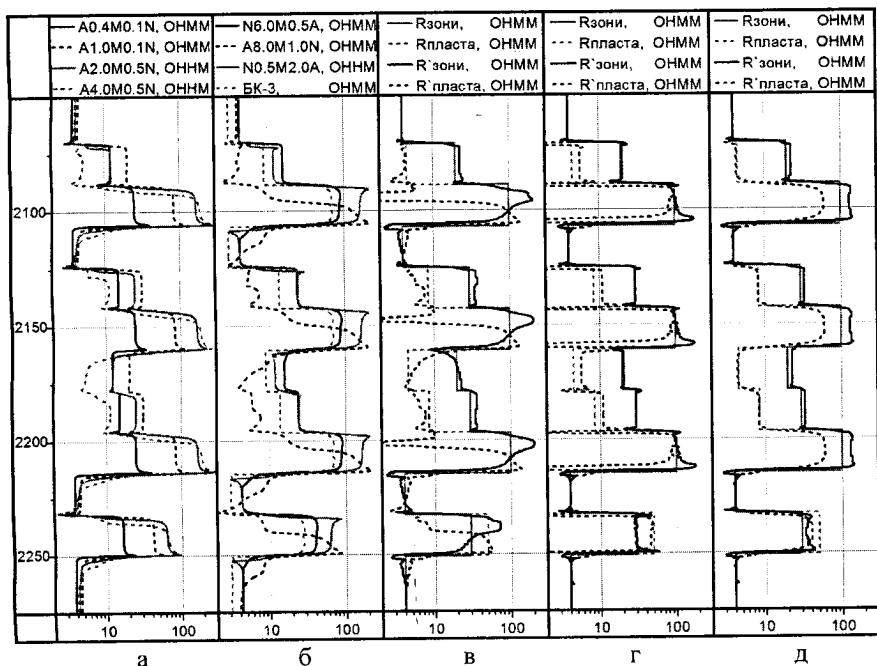
Почнемо з моделі розрізу, який складається з послідовності деяких найбільш типових моделей пластів (див. п. 4.2), а саме чергування в різній послідовності глинистих, ущільнених високоомних без проникнення, водонасичених, нафтонасичених та газонасичених пластів. Така сама модель розглядалась у п. 4.3 для порівняння даних моделювання запропонованим автором методом розв'язання прямої задачі ПК з даними, що були отримані за допомогою FemLab.

Будемо для зручності називати свердловину, що відповідає цій моделі, "Тестова-1".

На діаграмах 5.21.а, б – представлені діаграми зондів комплексу БКЗ+БК для свердловини Тестова-1.

На діаграмі 5.21.в – представлено результат розв'язання оберненої задачі для всіх зондів комплексу ( $\forall i: K_i = 1$ ) для цієї свердловини. Ми бачимо, як і слід було очікувати (порівнюючи з 5.7.а, 5.10.а), спотворення форми кривих в околах положень горизонтальних границь; суттєве спотворення значень ПО ущільнених високоомних пластів; спотворення ПО пластів підвищуючого проникнення, що є підшовою для високоомного; суттєве спотворення параметрів пласта (ПО зони та ПО пласта) знижуючого проникнення. В той же час задовільно (водонасиченого майже ідеально) виділяються параметри продуктивних пластів підвищуючого проникнення, покрівлю яких не є високоомні пласти.

Для таких інтервалів вже можна будувати інформативні криві зондування. Приклад однієї наведено на рис. 5.22 для нафтонасиченого пласта у порівнянні з істинною кривою зондування для заданої моделі



**Рис. 5.21.** Св. Тестова-1 (ПО бурового розчину 1 Ом·м).

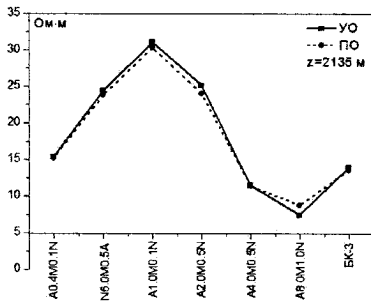
*а, б* – діаграми УО зондів комплексу; *в* – результат оберненої задачі, якщо всі  $K=1$ ; *г* –  $K_{A4.0M0.5N}=0$ ,  $K_{A8.0M1.0N}=0$ ; *д* –  $K_{A4.0M0.5N}=0$ ,  $K_{A8.0M1.0N}=0$  але  $K_{7F1.6}=1$

нафтонасиченого пласта. Таке майже ідеальне співпадіння кривих зондування і пояснює майже ідеальне співпадіння (рис. 5.23) встановленого профілю ПО в цій координаті з профілем ПО для заданої моделі нафтонасиченого пласта.

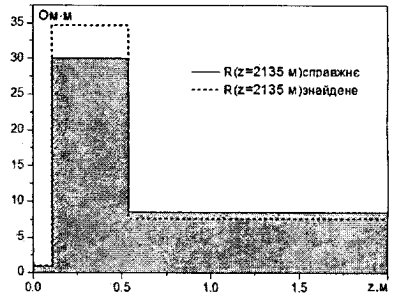
У випадку виключення з процесу розв'язання оберненої задачі чотириметрового і восьмиметрового зондів (рис. 5.21.г) ситуація очікувано покращується. Параметри всіх пластів, якщо і не завжди ідеально, то принаймні завжди добре визначаються за кривими шуканих параметрів. Єдиним недоліком є суттєве спотворення кривих в очікуваному okolí (пор. з рис. 5.10) положень горизонтальних границь пластів.

Але цей недолік дуже просто усувається шляхом приєднання до комплексу всього одного зонда ІК (в цьому випадку розглянутого вище зонда 7F1.6). Отриманий розв'язок з доданим зондом ІК (рис. 5.21.д) майже





**Рис. 5.22.** Порівняння отриманої кривої зондування в нафтонасиченому пласті та справжньої (шуканої)



**Рис. 5.23.** Порівняння справжнього профілю ПО моделі та знайденого профілю ПО в координаті  $z = 2135$  м

позбавлений спотворення кривих в околах положень горизонтальних границь пластів у порівнянні з попереднім результатом.

Це наочно демонструє переваги спільного використання даних і ЕК, і ІК в якості заданих граничних умов для оберненої задачі. Таке одночасне розв'язання оберненої задачі ЕК та ІК ми окремо будемо розглядати у главі 7.

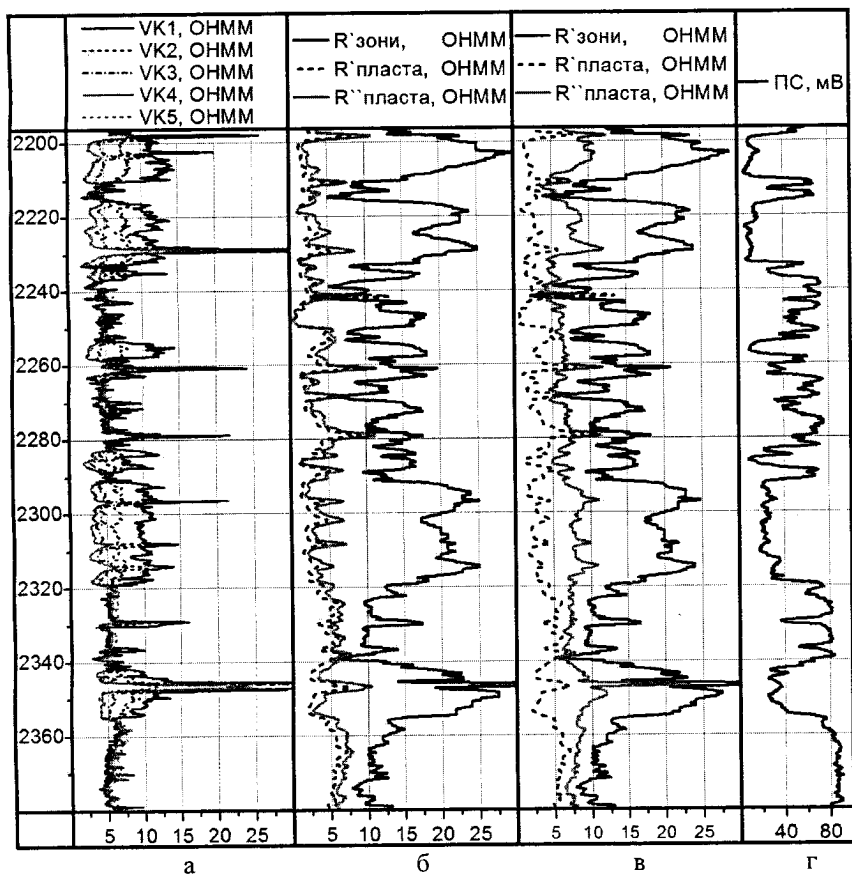
Одразу зазначимо той факт, що вертикальна роздільна здатність і комплексу БКЗ+БК і БКЗ+БК+ІК в основному визначається вертикальною роздільною здатністю БКЗ. Це треба пам'ятати при виборі вагових коефіцієнтів при мінімізації (5.1.4), особливо при розв'язанні оберненої задачі для контрастних тонкошаруватих нашарувань.

Тепер перейдемо до розв'язання оберненої задачі ЕК (БКЗ+БК) для реального свердловинного матеріалу (рис. 5.24), для свердловини, яку умовно будемо називати "Північно-Покурська".

Порівнювати отримані результати ми будемо з даними височастотного індукційного каротажного ізопараметричного зондування (ВКІЗ: криві VK1-VK5 відповідають зондам довжиною 0.5, 0.71, 1.0, 1.41, 2.0 м).

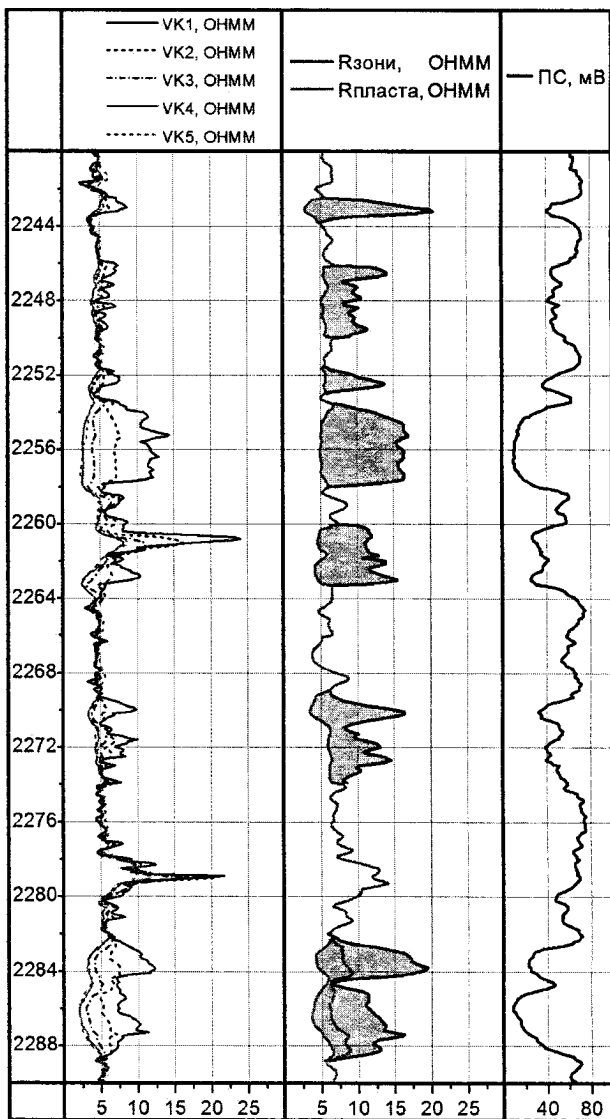
Як і раніше,  $R'$  зони та  $R'$  пласта – ПО, отримані в припущенні, що весь інтервал є інтервалом з проникненням, а  $R''$  пласта – ПО, отриманий у припущенні, що весь інтервал є непроникним.

Порівняння рис. 5.24.б та 5.24.в дозволяє дійти висновку, що для цього реального свердловинного інтервалу виключення чотириметрового та восьмиметрового зондів, на відміну від змодельованого матеріалу, практично зовсім не впливає на вертикальну роздільну здатність (відсутнє спотворення



**Рис. 5.24.** Св. Північно-Покурська (ПО бурового розчину 1.2-1.3 Ом·м).  
*а* – діаграми ВКІЗ; *б* – результат розв'язання оберненої задачі БКЗ+БК для всіх  $K=1$ ; *в* – результат розв'язання оберненої задачі БКЗ+БК при  $K_{A4.0M0.5N} = 0$ ,  $K_{A8.0M1.0N} = 0$ ; *г* – діаграма ПС

кривих в околах імовірного і найбільш очікуваного положення горизонтальних границь пластів): майже не відрізняються визначені в процесі розв'язання оберненої задачі ПО пласта та ПО зони у припущенні, що весь інтервал є проникним.



**Рис. 5.25.** Св. Північно-Покурська. Результат розв'язання оберненої задачі БКЗ+БК з використанням додаткової інформації про характер проникнення на досліджуваному інтервалі

Водночас ПО пласта, визначене у припущенні відсутності проникнення, суттєво відрізняється від ПО, визначеного в припущенні проникнення всього інтервалу дослідження.

Дійсно, в припущенні наявності проникнення і його відсутності ПО пласта майже збігаються при наявності восьмиметрового зонда в комплексі. Коли два найбільших нефокусованих зонди прибираються, то ПО пласта, в припущенні відсутності проникнення, стає якимось "середнім" між ПО зони і ПО пласта при наявності проникнення. Отже, при наявності великих зондів і при підвищуючому проникненні (що є визначальним в даному випадку), комплекс БКЗ+БК є найбільш чутливим до ПО неушкодженої фільтратом бурового розчину частини пласта. Зміна ПО зони проникнення в цьому випадку виявляється ефектом меншої величини.

Цей факт, взагалі кажучи, ускладнює процес інтерпретації, оскільки без додаткового матеріалу, як це впливає з отриманого результату, ми не можемо однозначно встановити проникливість інтервалу.

Дійсно, кожен з двох наведених результатів отримано коректно із своєю величиною похибки, які між собою практично не відрізняються.

Саме такі результати, як це зображено на рис. 5.24.б, свідчать про те, що зона проникнення є, але має малий радіус. Тобто зміна ПО зони нівелюється її малим розміром. Це підтверджується і даними ВКІЗ (на інтервалах, де за іншими методами проникнення не повинно бути визначено – діаметр зони проникнення  $D/d$  складає 1.5-2.5, на інтервалах, де гарантовано є проникнення,  $D/d$  складає 2.5-6.0).

У такому випадку або у випадку, коли дійсно без додаткових методів не можна відрізнити інтервали "з" і "без" проникнення, слід діяти таким чином.

Ми розв'язуємо обернену задачу у припущенні наявності проникнення на всьому інтервалі (визначаємо  $R'$  зони та  $R'$  пласта) і у припущенні, що інтервал є непроникним (визначаємо  $R''$  пласта). Розбиваємо досліджуваний інтервал за допоміжними методами на інтервали з проникненням і без нього і на перших вважаємо результатом розв'язку  $R'$  зони та  $R'$  пласта, а на других –  $R''$  пласта. Саме такий підхід продемонстровано на рис. 5.25. Інтервали з проникненням виділені за ПС та даними інтерпретації ВКІЗ.

Підвищення точності очікується при додаванні до комплексу БКЗ+БК інших зондів електрометрії, наприклад, хоча би одного зонда ІК (див. главу 7).

# РОЗВ'ЯЗАННЯ ОБЕРНЕНОЇ ЗАДАЧІ ІНДУКЦІЙНОГО КАРОТАЖУ

## 6.1. Факторизація оберненої задачі

Узагальнюючи викладене вище щодо загальної теорії обернених задач електрометрії, звернемось до специфіки обернених задач саме ІК.

По-перше, відмітимо, що задача ІК, в наближенні теорії Доля, є лінійною і, отже, ми можемо її факторизувати (знову використовуючи цей термін виключно у розумінні заміни однієї двовимірної задачі двома одновимірними задачами за аналогією з методом відокремлення змінних при вирішенні диференціальних рівнянь у часткових похідних).

Отже, спочатку розв'яжемо задачу вздовж осі свердловини (вісь  $z$  в ЦСК) в припущенні, що розв'язок не залежить від координати  $r$ , а потім – набір одновимірних задач по координаті  $r$ , вважаючи, що їх розв'язки не пов'язані між собою (не містять змінну  $z$  в явному вигляді).

Мовою електрометрії це означає, що після факторизації (розв'язання задачі по осі  $z$ ) значення в кожній точці (при поточковому розв'язанні) чи в кожному пласті (в попластовому розв'язанні) відповідає значенню, отриманому в пласті нескінченної потужності.

Виявляється, що зонди ІК, що мають різну глибину дослідження, також мають різну просторову роздільну здатність вздовж осі свердловини (вертикальну для вертикальних свердловин).

Це безпосередньо впливає з умови нормування геометричного фактора (3.1.3).

Дійсно, введення такого обмеження на величину геометричного фактора не дозволяє одночасно його збільшити за двома координатами: чим більше «локалізованим» виявляється вертикальний геометричний фактор, тим менше – радіальний і навпаки.

Тому точне визначення геоелектричних параметрів малопотужних і віддалених від стінки свердловини ділянок середовища є проблематичним (наприклад, провідність частини малопотужного пласта, неушкодженої фільтратом бурового розчину при великих радіусах зони проникнення).

І якщо при дослідженні пластів, потужність яких значно перевищує довжини зондів, ця проблема не виникає, то при дослідженні пачок малопотужних пластів (а саме ця задача є найбільш актуальною на сьогодні) вона і є однією з ключових.

Для її вирішення використовують різні підходи: введення поправки «за вміщуючі», «математичне фокусування», «метод деконволюції», застосування синтетичних зондів тощо (Плюснин, 1968; Anderson, Barber, 1997; Миронцов, 2010а). Однак ці методи в основному не є регуляризуючими. У той час як коректним підходом була б факторизація, заснована на регуляризації.

Факторизація оберненої задачі ІК – задача нетривіальна, хоча б через те, що самі по собі обернені задачі, в загальному випадку, є некоректними і тому вимагають застосування регуляризаційних методів розв'язання.

Для задачі ІК факторизація потребує розв'язання РФ – задачі, некоректно поставленої за Адамаром і добре відомої як в геофізиці (Страхов, 1967), так і в математиці (Тихонов, Арсенін, 1979; Бакушинский, Гончарский, 1989; Тихонов та ін., 1990). Розглянемо її.

Рівняння, що пов'язує УП і ПП в лінійній теорії Доля у випадку однорідного нескінченного пласта, можна записати у вигляді РФ:

$$\bar{\sigma}(z) = \int g(z') \sigma(z - z') dz', \quad (6.1.1)$$

де  $z$  – координата в ЦСК,  $g$  – вертикальний геометричний фактор зонда.

Обравши обмежений інтервал  $L$  і розклавши на ньому функції, що входять у (6.1.1) у ряд Фур'є:

$$\bar{\sigma}(z) = \sum_{n=-\infty}^{\infty} \bar{\sigma}_n \cdot e^{-inz},$$

$$\sigma(z - x) = \sum_{n=-\infty}^{\infty} \sigma_n \cdot e^{-inz} \cdot e^{inx},$$

$$g(x) = \sum_{n=-\infty}^{\infty} g_n \cdot e^{-inx},$$

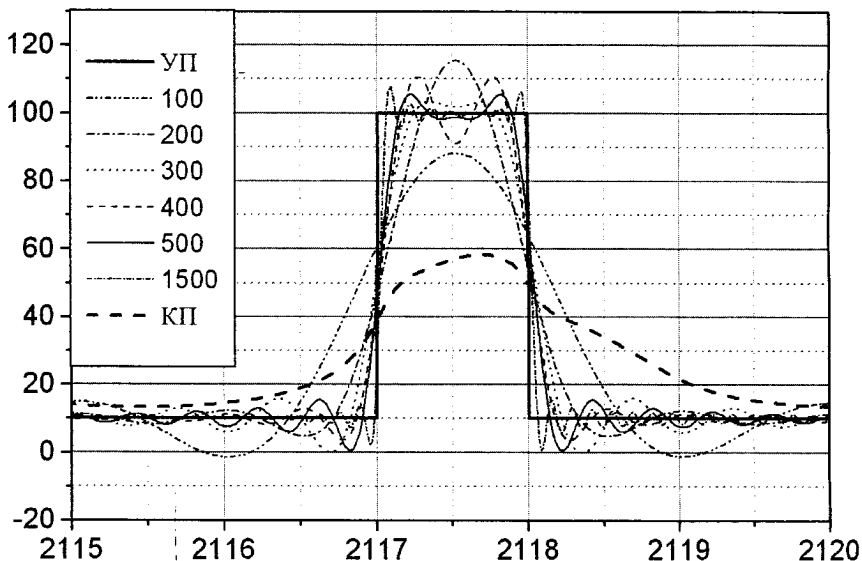


Рис. 6.1. Провідність. Шифр кривих – кількість членів ряду

можемо записати рівняння, що пов'язують коефіцієнти їх розкладів (Миронцов, 2009a; 2009b, 2009d; 2009e; 2010c; 2011e; Myrontsov, 2010b):

$$\sigma_n = \frac{\bar{\sigma}_n}{g_n^*}. \quad (6.1.2)$$

Отже, використаємо розв'язання оберненої задачі ІК, засноване на представленні шуканої функції рядом Фур'є з коефіцієнтами, розрахованими за (6.1.2). При цьому позначимо функцію, представлену рядом Фур'є обмеженої кількості  $n$  членів як  $\bar{\sigma}_n$ .

Зупинимося на питанні вибору кількості членів такого ряду. Очевидність такого вибору впливає хоча б з порівняння форми результату, отриманого таким методом, в залежності від кількості членів ряду розкладу.

На рис. 6.1 представлені такі залежності.

Очевидно, що для практичного використання такого підходу необхідний суворий математичний критерій. Такий математичний критерій, на нашу думку, має полягати в мінімальній відстані між  $\bar{\sigma}$  і  $\sigma'_n$  в деякому

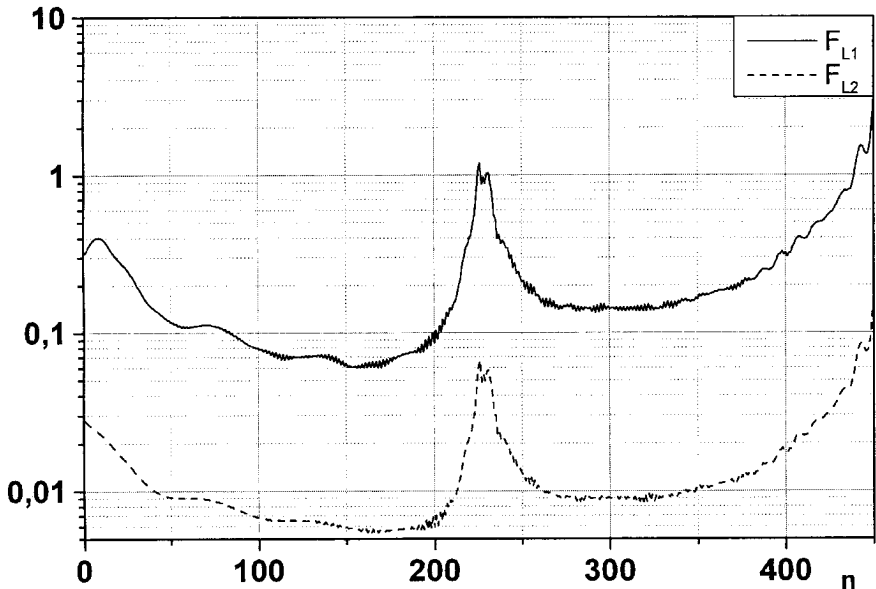


Рис. 6.2. Приклад залежності похибки визначення провідності поодинокого пласта від кількості членів ряду

нормованому просторі. Наприклад, в  $L_1$  і  $L_2$  такий критерій буде означати необхідність знайти мінімальне значення функціонала:

$$F_{L1}(n) = \int_L \left| \bar{\sigma}(z) - \int_L g(z' - z) \bar{\sigma}'_n(z') dz' \right| \cdot dz, \quad (6.1.3)$$

або

$$F_{L2}(n) = \sqrt{\int_L \left| \bar{\sigma}(z) - \int_L g(z' - z) \bar{\sigma}'_n(z') dz' \right|^2 \cdot dz}, \quad (6.1.4)$$

відповідно. Кількість членів ряду в даному випадку можна вважати регуляризаційним параметром.



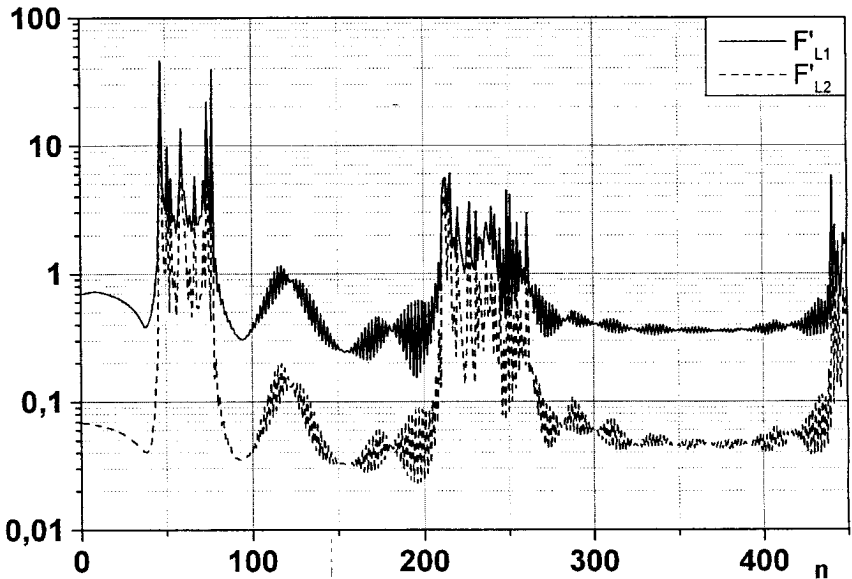


Рис. 6.3. Приклад залежності похибки визначення опору поодинокого пласта від кількості членів ряду

Продемонструємо можливості описаного способу. Як приклад будемо розглядати апаратуру 4ІК (графіки вертикальних геометричних факторів якої зображені на рис. 3.15).

Для вибору оптимальної кількості членів ряду, необхідно визначити, в яких величинах нас цікавить результат: в одиницях ПО чи ПП. Виявилось, що вибір одиниці вимірювання впливає на оптимальну кількість членів ряду: на рис. 6.2, 6.3 показана така різниця для однієї і тієї ж моделі (в монографії (Миронцов, 2012d) міститься помилка – опис відповідає іншій моделі, ніж та, для якої наведені графіки, що відмітили деякі уважні читачі).

Отже, на рис. 6.2 наведено приклад залежності похибки відновлення ПП для зонда П.26 від кількості членів ряду для моделі поодинокого пласта, а на рис. 6.3 представлені графіки похибки відновлення ПО, розраховані за допомогою функціоналів:

$$F'_{L1}(n) = \int_L \left| \bar{\sigma}^{-1}(z) - \left( \int_L g(z' - z) \bar{\sigma}'_n(z') dz' \right)^{-1} \right| \cdot dz, \quad (6.1.5)$$

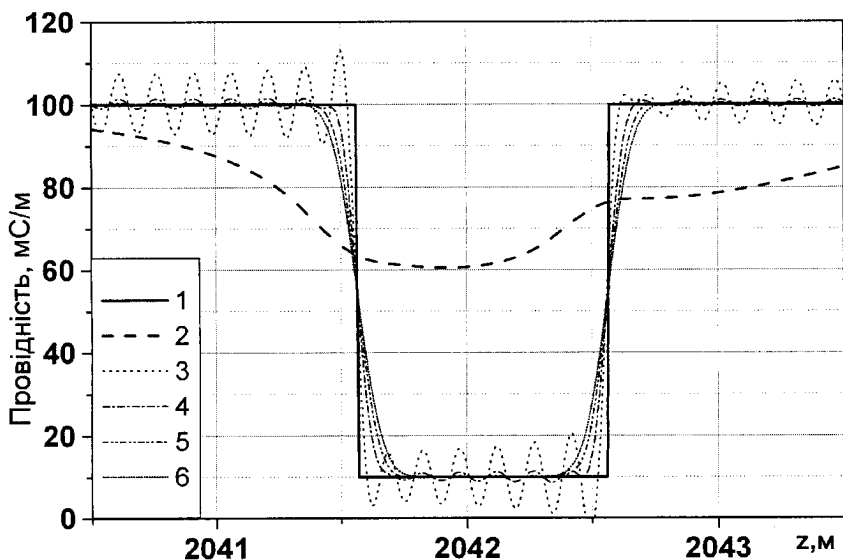


Рис. 6.4. Провідність: 1 – шукана  $\sigma$ ; 2 – уявна  $\sigma$ ; 3 –  $\sigma_{400}$  без «згладжування»; 4 –  $\sigma_{400}$  після 20 «згладжувань»; 5 –  $\sigma_{400}$  після 40 «згладжувань»; 6 –  $\sigma_{400}$  після 60 «згладжувань»

та

$$F'_{L2}(n) = \sqrt{\int_L \left| \bar{\sigma}^{-1}(z) - \left( \int_L g(z'-z) \bar{\sigma}'_n(z') dz' \right)^{-1} \right|^2 \cdot dz} . \quad (6.1.6)$$

Більш того, як показали результати числового моделювання, оптимальне значення числа членів ряду залежить також від величини  $L$  інтервалу та особливостей просторового розподілу провідності вздовж осі свердловини. Таким чином, визначення оптимальної кількості членів ряду – перший крок в процесі виконання завдання для кожної нової моделі розрізу.

Одна з особливостей переважної більшості моделей, що розглядаються при розв'язанні задач електрометрії – їх кусково-постійний просторовий розподіл провідності не тільки вздовж осі свердловини, але і по нормалі до неї (чи то ПО зони проникнення або ПО неушкодженої фільтратом бурового

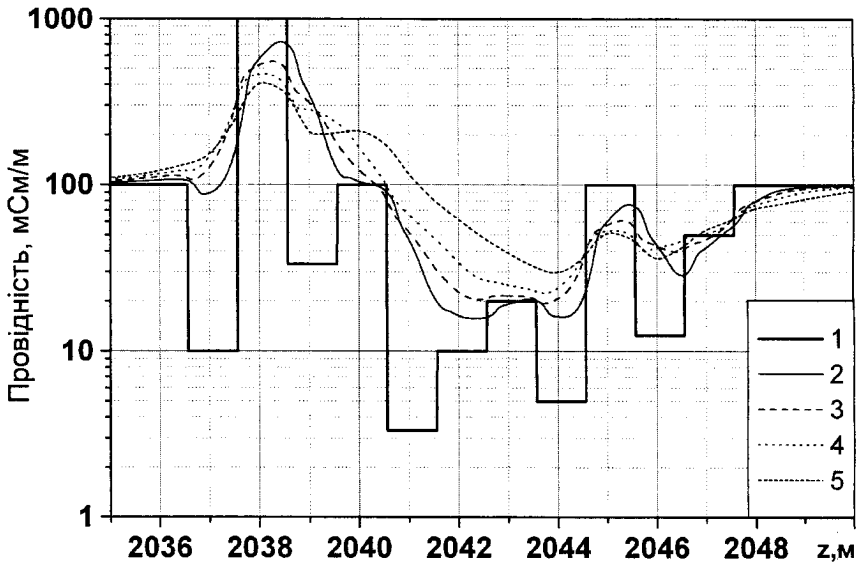


Рис. 6.5. Провідність: 1 – ПП; 2 – УП зонда І0.5; 3 – УП зонда І0.85; 4 – УП зонда І1.26; 5 – УП зонда І2.05

розчину частини пласта). Як відомо, ряд Фур'є, що відповідає кусково-постійній функції, має особливість Гіббса в районі точок розриву (Никольский, 1973). Щоб уникнути впливу такої особливості на результат, до знайденої функції  $\sigma'_n$  була застосована процедура багаторазового «згладжування», яку можна описати виразом:

$$\sigma'_n(z) = 0.5(\sigma'_n(z) + \sigma'_n(z - \Delta z)).$$

На рис. 6.4. представлені графіки відновленої провідності для моделі поодинокого пласта з різною кількістю «згладжувань». Очевидно, що для представленої моделі така процедура дозволяє практично повністю виключити явище Гіббса, не змінивши при цьому характерних значень ПП пласта.

Продемонструємо можливості описаного способу на моделі пачки пластів, потужність кожного з яких складає 1 м. На рис. 6.5. представлено відповідний розподіл ПП і графіки УП всіх зондів. На рис. 6.6. представлені відновлені провідності. Якщо на графіках УП деякі пласти навіть візуально абсолютно не відокремлювались між собою (відсутні відповідні екстремуми

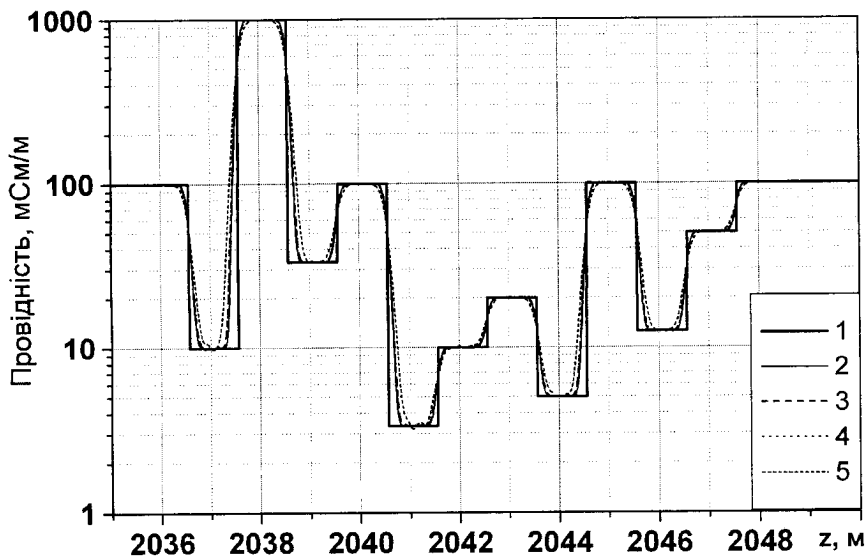


Рис. 6.6. Провідність: 1 – ПП; відновлена: 2 – зонда I0.5; 3 – зонда I0.85; 4 – зонда I1.26; 5 – зонда I2.05

і, як показав числовий аналіз, в області деяких границь друга похідна не дорівнює нулю), то відновлені ПП точно повторюють характер розподілу шуканої ПП.

На рис. 6.7.1-6.7.4 представлені результати відновлення провідності для зондів різної довжини та для іншої моделі розрізу. Очевидно, що для такого розрізу вертикальна роздільна здатність всіх зондів комплексу стає майже однаковою і відповідає роздільній здатності меншого зонда комплексу.

Перейдемо тепер до розгляду не провідності, а опору і розглянемо модель трьох пластів-колекторів, розділених прошарками без проникнення, характеристики яких відповідають умовам Західного Сибіру (див. глава 4, п.4.2):

- водонасичений колектор:  $\rho_{II} = 4,5 \text{ Ом}\cdot\text{м}$ ,  $\rho_3 = 20 \text{ Ом}\cdot\text{м}$ ,  $D/d = 5$ ;
- нафтонасичений колектор:  $\rho_{II} = 8,5 \text{ Ом}\cdot\text{м}$ ,  $\rho_3 = 30 \text{ Ом}\cdot\text{м}$ ,  $D/d = 4$ ;
- газонасичений колектор:  $\rho_{II} = 50 \text{ Ом}\cdot\text{м}$ ,  $\rho_3 = 30 \text{ Ом}\cdot\text{м}$ ,  $D/d = 5$ .

Для усіх випадків ПО свердловини дорівнює  $2 \text{ Ом}\cdot\text{м}$ , радіус –  $0,108 \text{ м}$ . На рис. 6.8.1. представлені каротажні криві апаратури 4ІК вздовж цих пластів, а на рис.6.8.2. представлені відновлені по кожному зонду

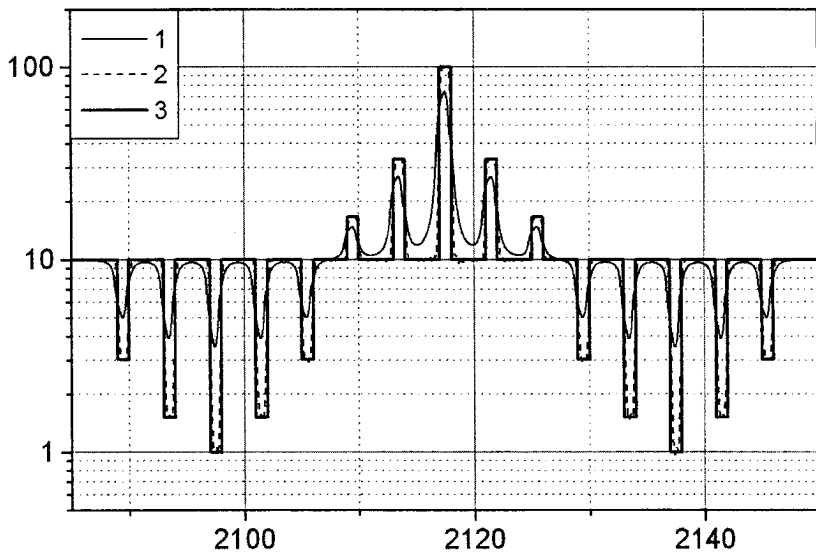


Рис. 6.7.1. Зонд І0.5. Провідність: 1 – уявна; 2 – відновлена; 3 – шукана

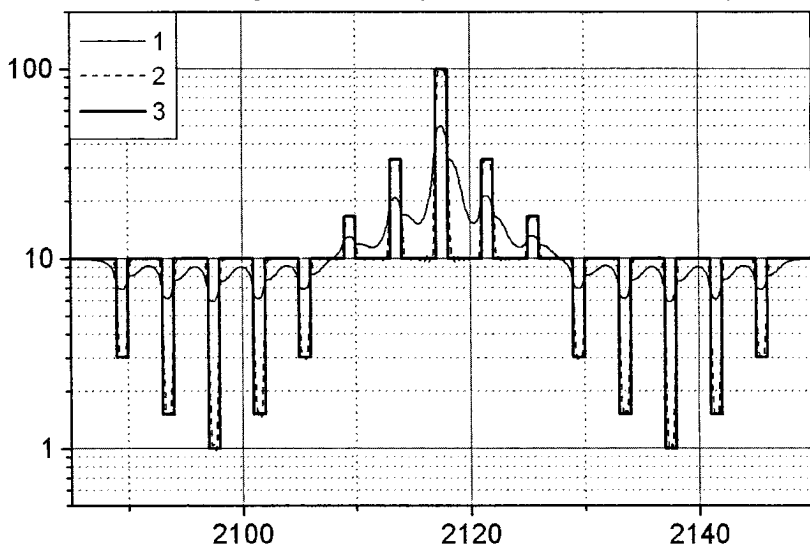


Рис. 6.7.2. Зонд І0.85. Провідність: 1 – уявна; 2 – відновлена; 3 – шукана

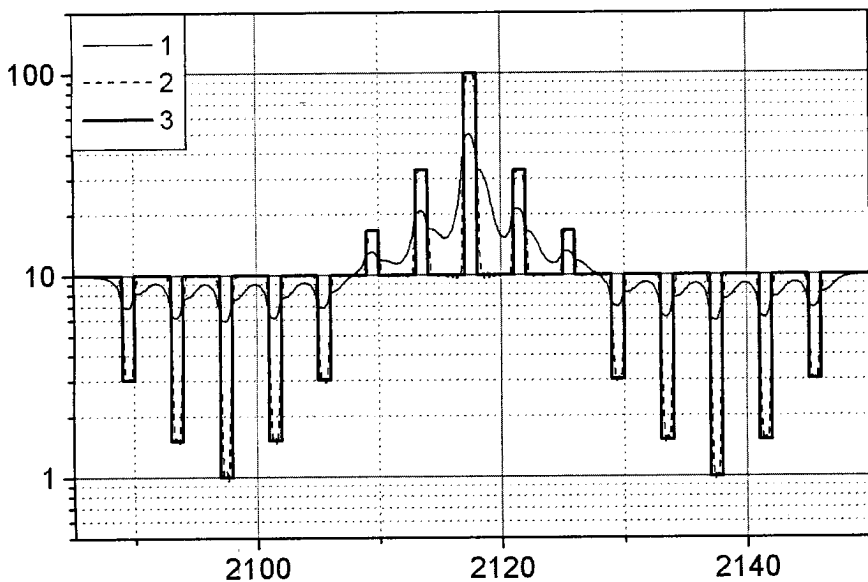


Рис. 6.7.3. Зонд I1.26. Провідність: 1 – уявна; 2 – відновлена; 3 – шукана

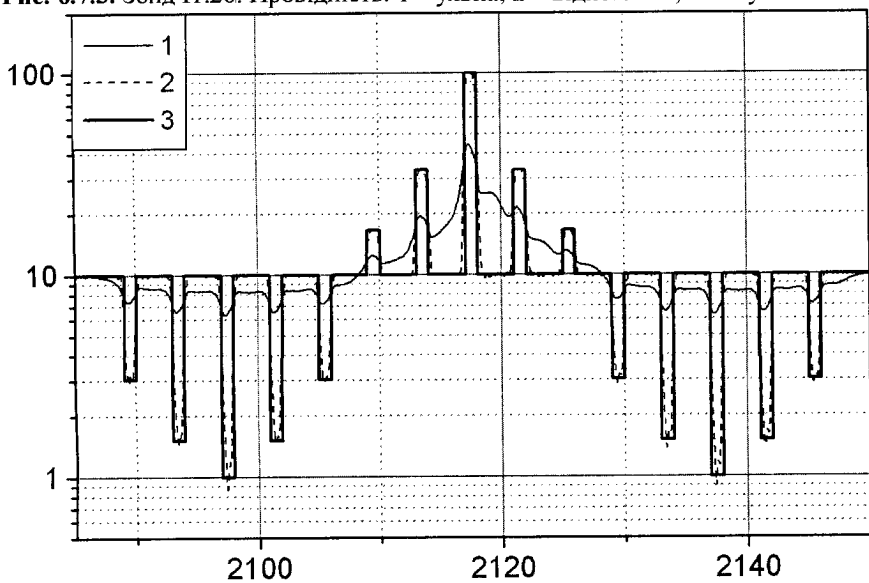


Рис. 6.7.4. Зонд I2.05. Провідність: 1 – уявна; 2 – відновлена; 3 – шукана

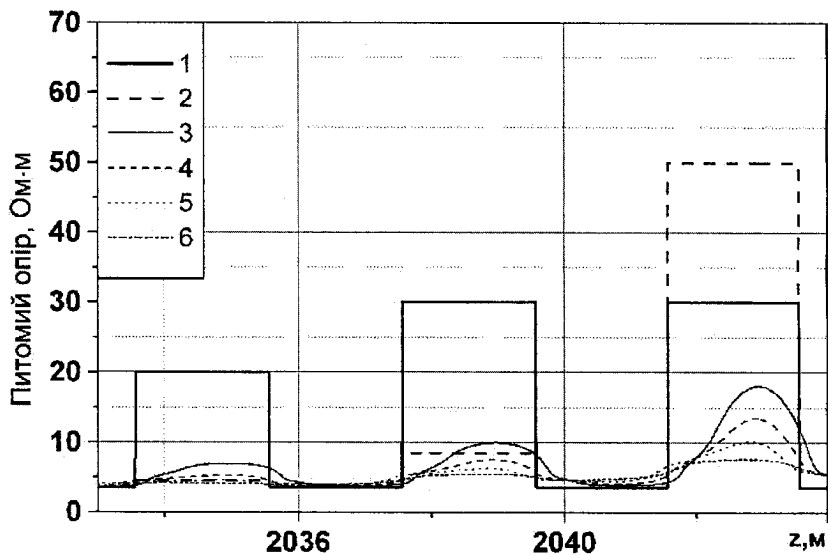


Рис. 6.8.1. ПО: 1 – зони; 2 – пласта; УО зондів: 3 – І0.5; 4 – І0.85; 5 – І1.26; 6 – І2.05

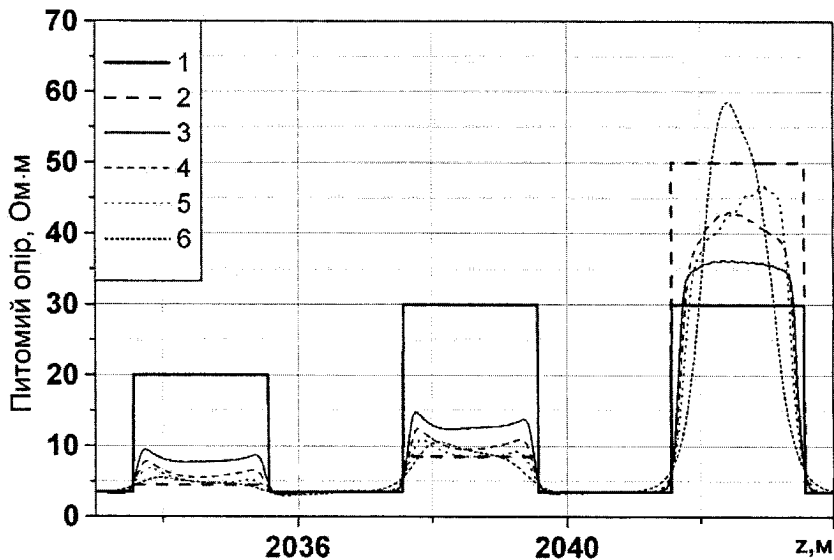


Рис. 6.8.2. ПО: 1 – зони; 2 – пласта; відновлений за зондами: 3 – І0.5; 4 – І0.85; 5 – І1.26; 6 – І2.05

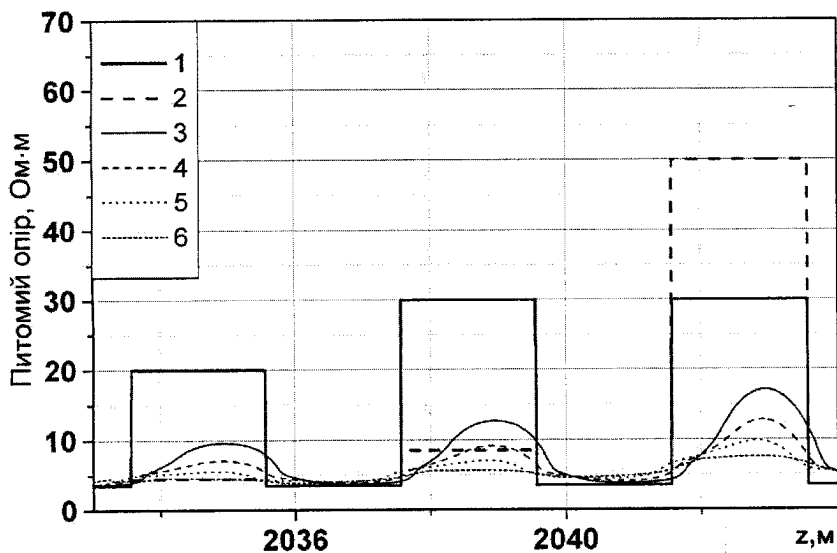


Рис. 6.9.1. ПО: 1 – зони; 2 – пласта; УО зондів: 3 – І0.5; 4 – І0.85; 5 – І1.26; 6 – І2.05

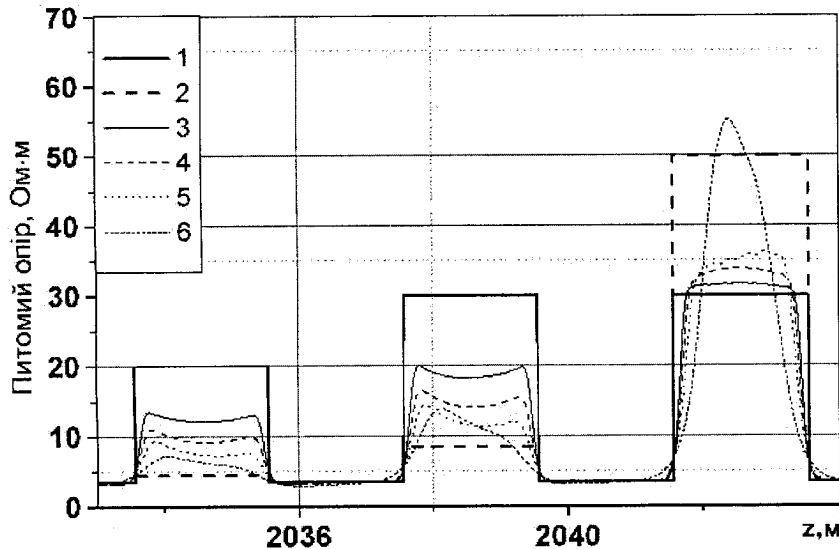


Рис. 6.9.2. ПО: 1 – зони; 2 – пласта; відновлений за зондами: 3 – І0.5; 4 – І0.85; 5 – І1.26; 6 – І2.05



провідності. На рис. 6.9.1 і 6.9.2 наведені аналогічні криві для моделі, в якій у всіх цих пластів збільшений діаметр зони проникнення у два рази.

Для розглянутої моделі можна зробити висновок, що із збільшенням довжини зонда величина спотворення форми ПП збільшується. Більш того, дані зонда I2.05 виявляються неінформативними в обох випадках для пласта із зниженим проникненням, а збільшення зони проникнення призводить до збільшення точності трьох найменших зондів.

Таке спотворення, окрім іншого, спонукає дослідити правомірність застосування описаного способу факторизації для випадку радіально-неоднорідних пластів.

Природа такого спотворення закладена в самому методі. Дійсно, в разі радіально-неоднорідного розподілу провідності вихідне рівняння (6.1.1) слід замінити рівнянням:

$$\int_0^{\infty} \bar{\sigma}(z, r) \cdot dr = \int_0^{\infty} \int_0^L g(x, r) \cdot \sigma(z-x, r) \cdot dx \cdot dr,$$

де  $r$  – відстань в ЦСК. Відповідно замість (6.1.2) слід розглядати вираз:

$$\int_0^{\infty} \sigma_n(r) \cdot g_n(r) \cdot dr = \int_0^{\infty} \bar{\sigma}_n(r) \cdot dr.$$

Очевидно, що вираз:

$$\int_0^{\infty} \sigma_n(r) \cdot dr = \frac{\int_0^{\infty} \bar{\sigma}_n(r) \cdot dr}{\int_0^{\infty} g_n(r) \cdot dr},$$

є вірним тільки в тих випадках, коли суворо виконується рівність:

$$\int_0^{\infty} \sigma_n(r) \cdot g_n(r) \cdot dr = \left( \int_0^{\infty} \sigma_n(r) \cdot dr \right) \cdot \left( \int_0^{\infty} g_n(r) \cdot dr \right).$$

Це потрібно мати на увазі при розв'язанні двовимірних задач ІК для розрізів з радіально-неоднорідним розподілом ПП вздовж пластів. А саме такий розподіл ми завжди маємо в реальних умовах каротажу, бо наявність свердловини якраз і утворює радіальну неоднорідність розподілу ПП по нормалі до осі свердловини, яку зона проникнення тільки посилює.

Проте, як показує практика, такий вплив є незначним і описаний спосіб може ефективно застосовуватись до потужних пластів.

Тепер потрібно дослідити питання, наскільки стійким виявляється запропонований спосіб розв'язання некоректної задачі розв'язання РФ до впливу похибки на початкові умови.

## **6.2. Вплив похибки на розв'язання оберненої задачі**

Наведені приклади дозволяють зробити висновок: застосування описаного способу покращує вертикальну роздільну здатність ІК таким чином, що роздільна здатність зондів довжиною 0.5 і 2.05 м стає однаковою. Однак отримати в реальних умовах як завгодно високу вертикальну роздільну здатність не є можливим.

Дійсно, обмеження на потужність пласта, для якої доцільно застосування даного методу, обумовлено кроком вимірювання вздовж осі свердловини. На рис. 6.10. наведено криву неперервного запису вздовж пластів потужністю 0.1 і 0.2 м і для порівняння наведено два можливих набори значень дискретного запису даних такого виміру з кроком 0.1 м. Відмінності в значеннях у точках вибраного запису показують, що для пластів потужністю меншою 0.3 м (при прийнятому на практиці запису з кроком 0.1 м) похибка, яку вносить вибір точок запису, може сягати істотних величин (близько 50%), і тим самим виділення таких пластів в окремі об'єкти дослідження недоцільно.

Розглянемо, як взагалі може вплинути похибка на точність запропонованого методу (Миرونцов, 2011d). Зауважимо, що результат ІК, як і будь-якого іншого каротажу, взагалі кажучи, є сукупністю величини безпосередньо виміру разом із величиною похибки, що відповідає цьому виміру. Іншими словами, початковою умовою вирішення РФ (6.1.1) буде не значення вимірної функції УП, а якийсь довірчий інтервал, що відповідає кожному виміру. І якщо для теоретичних досліджень деяких аспектів методології розв'язання РФ або для порівняння ефективності різних підходів такого розв'язання можна вважати, що початкові дані задані без похибки, то для практичного застосування алгоритму розв'язання РФ питання впливу

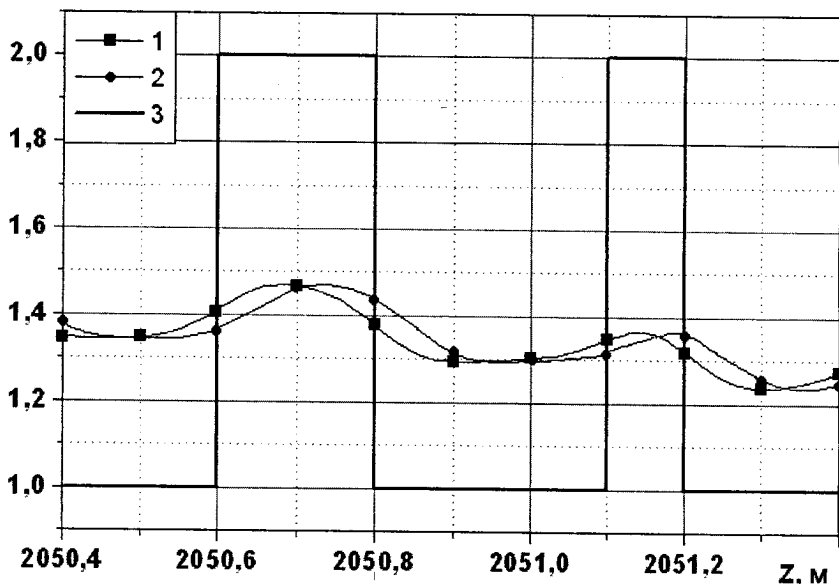


Рис. 6.10. Порівняння УП для різних точок запису. 1, 2 – записи із кроком 0.1 м, що посунуті один відносно другого на 0.05 м; 3 – ПП

похибки виміру на остаточний результат є визначальним при оцінці ефективності методу в цілому.

Дослідимо це питання, для чого додамо в ліву частину (6.1.1) функцію  $\delta(z)$ , яка і буде відповідати реальній похибці каротажу:

$$\bar{\sigma}(z) + \delta(z) = \int_L g(z') \sigma(z - z') dz'. \quad (6.2.1)$$

Вид функції  $\delta$  визначається типом похибки, що моделюється (випадкова, систематична, вимірювання тощо). Основним обмеженням на такий вид буде прийняте в промисловій геофізиці для методу ІК обмеження на допустиму величину похибки виміру (співвідношення «шум/сигнал») (Плюснин, 1968):

$$|\delta(z)| \leq \alpha \cdot \bar{\sigma}(z), \quad \alpha = 0,1. \quad (6.2.2)$$

Це обмеження може відповідати нескінченному числу функцій  $\delta$ . Розглянемо три основних, на нашу думку, їх типи.

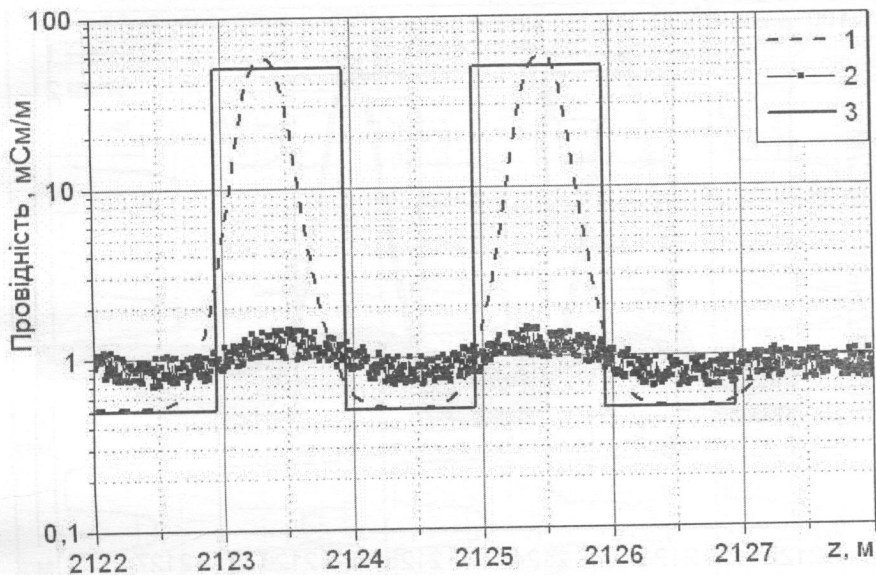


Рис. 6.11. Результат розв'язання РФ запропонованим методом при наявності випадкової похибки. 1 – відновлена ПП, 2 – виміряна УП, 3 – шукана ПП розрізу

По-перше, розглянемо випадкову похибку, коли її функція задається для кожного вимірювання за допомогою «генератора випадкових чисел».

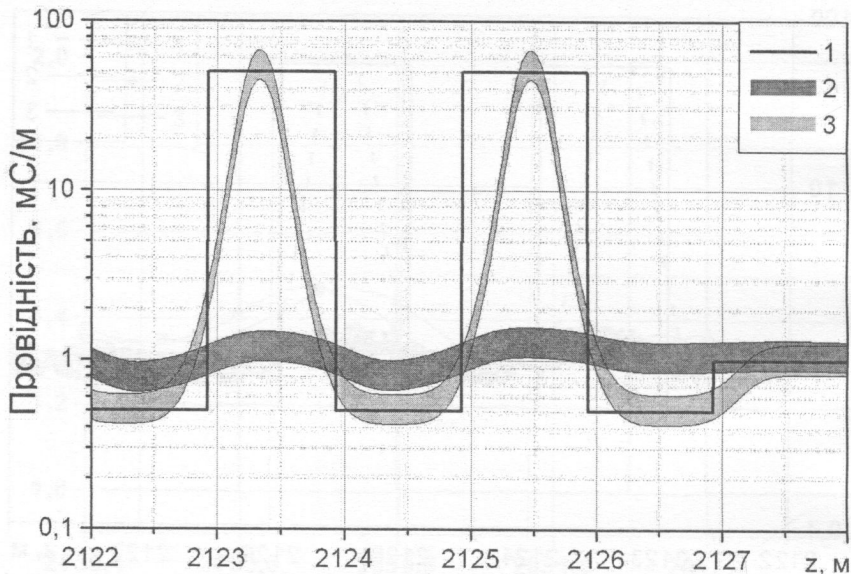
По-друге, уявімо довірчий інтервал розв'язання РФ, що відповідає обраному значенню у точці з координатою  $z$ , у вигляді інтервалу між розв'язками двох рівнянь в цій точці:

$$(1 + \alpha) \cdot \bar{\sigma}(z) = \int_L g(z') \cdot \sigma(z - z') \cdot dz', \quad (6.2.3)$$

$$(1 - \alpha) \cdot \bar{\sigma}(z) = \int_L g(z') \cdot \sigma(z - z') \cdot dz'. \quad (6.2.4)$$

По-третє, розглянемо похибку у вигляді якоїсь періодичної функції, період якої перевищує крок виміру (випадок, коли період такої функції менше кроку запису, відповідає першому типу).

І одразу зауважимо, що останній тип можна зіставити з будь-яким видом функції похибки, що задовольняє (6.2.2), так як будь-яка функція може бути представлена у вигляді ряду періодичних функцій.

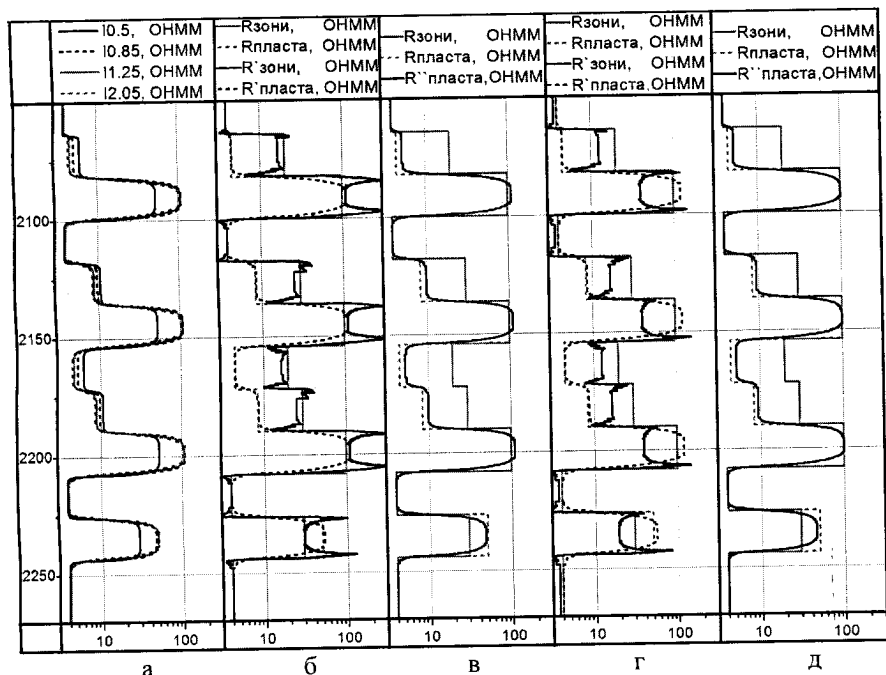


**Рис. 6.12.** Результат розв'язання РФ запропонованим методом при наявності похибки. 1 – шукана ПП розрізу, 2 – інтервал допустимих значень УП, 3 – інтервал допустимих значень відновленої ПП

На рис. 6.11 представлені результати першого типу завдання похибки зонда І2.05 (крок запису 0.1 м). Зауважимо, що при безпосередньому розв'язанні (6.2.1) при наявності похибки у вигляді випадкової величини результат був негативним (рішення без урахування похибки і з її урахуванням відрізнялося в сотні разів). Однак виявилось, що застосування вже згадуваної в п. 6.1 простої процедури згладжування для початкових умов дозволило усунути випадкову складову. Крім того, згладжування сигналу до застосування описаного методу дозволило не повторювати цю процедуру після відновлення ПП (для зменшення впливу явища Гіббса).

Таким чином, розв'язання РФ для такого типу похибки ніяк не відрізняється від розв'язання без похибки. Завдання в цьому випадку зводиться до фільтрації вхідного сигналу.

На рис. 6.12 представлені результати для зонда І2.05 для другого типу похибки. Очевидно, що для розглянутого прикладу величина довірчого інтервалу розв'язання РФ кількісно відповідає (пропорційна) довірчому інтервалу заданих початкових умов.



**Рис. 6.13.** Св. Тестова-1 (ПО бурового розчину 1 Ом·м).

*а* – діаграми зондів; *б, в* – результат, отриманий при ПО свердловини 1 Ом·м; *г, д* – результат, отриманий при ПО свердловини 3 Ом·м

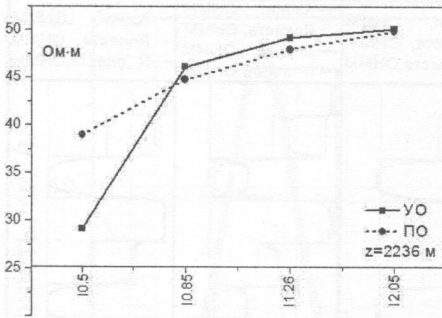
Результат розв'язання для третього типу похибки виявився зів'язним за величиною з результатом, отриманим для другого типу похибки.

### 6.3. Розв'язання оберненої задачі 4К

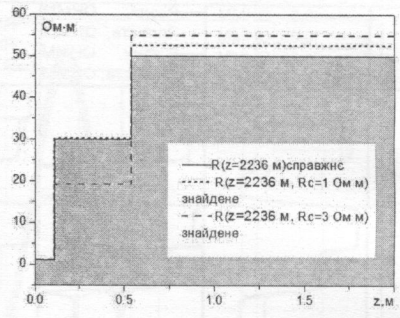
Розглянемо тепер приклад розв'язання оберненої задачі комплексу 4К. Почнемо розгляд з моделі того ж розрізу, що і в п. 5.3, тобто розрізу, який складається з послідовності деяких найбільш типових моделей пластів, розглянутих в п. 4.2.

На діаграмах 6.13.а – представлені змодельовані діаграми зондів комплексу.

На діаграмі 6.13.б – представлено результат розв'язання оберненої задачі у припущенні, що весь інтервал є проникним ( $R'_п$  – знайдений ПО



**Рис. 6.14.** Порівняння отриманої кривої зондування в газонасиченому пласті та справжньої (шуканої)



**Рис. 6.15.** Порівняння справжнього профілю ПО моделі газонасиченого пласта та знайденого профілю ПО

пласта,  $R'_3$  – знайдений ПО зони), на діаграмі 6.13.в. представлено результат у припущенні, що на всьому інтервалі проникнення відсутнє ( $R''_{II}$  – знайдений ПО пласта).

Для однієї з координат пласта ( $z = 2236$ ), що відповідає моделі газонасиченого, побудуємо криві зондування (рис. 6.14). Ми бачимо, що незважаючи на деяку розбіжність у значеннях УО для малого зонда, встановлений профіль ПО в обраній координаті добре збігається із заданим профілем газонасиченого пласта (рис. 6.15).

Така розбіжність для малого зонда і добра відповідність при цьому встановленого та відомого профілю ПО наводить на думку, що визначення профілю ПО не чутливе до змін ПО ближньої зони (свердловини в першу чергу).

Але зміна ПО свердловини при розв'язанні оберненої задачі з 1 Ом-м на 3 Ом-м призвела до значної зміни профілю встановленого ПО (рис. 6.15) і особливо до зміни значення ПО зони.

Це свідчить про суттєвий вплив значення ПО бурового розчину на результат розв'язання оберненої задачі. Для оцінки величини цього впливу дослідимо, як величина ПО бурового розчину впливає на розв'язання прямої задачі.

Для цього розглянемо в наближенні Доля сигнал  $\sigma$  від пласта нескінченної потужності з ПП  $\sigma_{II}$ , розкритого свердловиною з ПП  $\sigma_C$  :

$$\sigma = \sigma_C g_C + \sigma_{II} (1 - g_C),$$

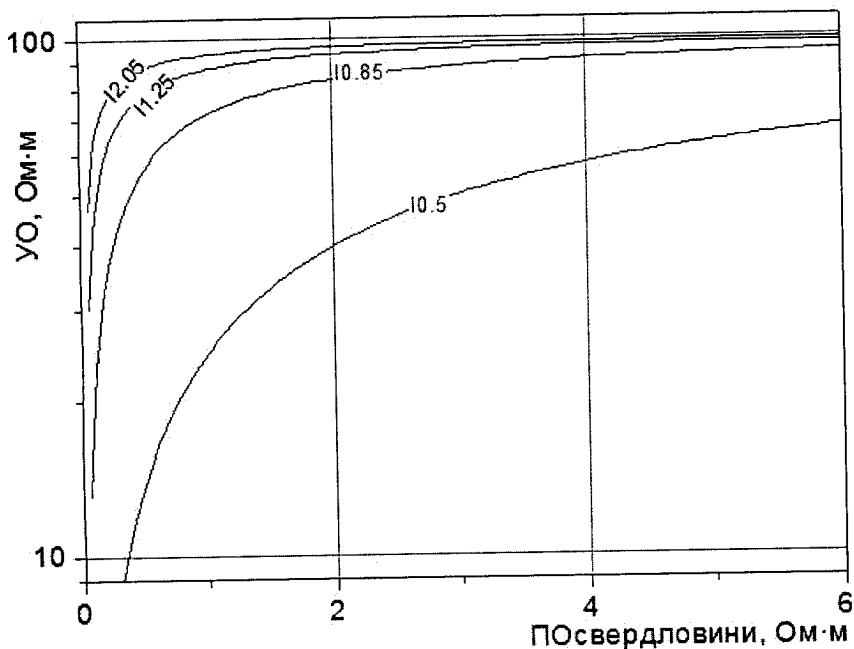


Рис. 6.16. Залежність УО від ПО свердловини ( $r_C = 0.216$  м) для заданого ПО пласта 100 Ом·м

де  $g_C$  – інтегральний радіальний геометричний фактор свердловини. Враховуючи, що ПП є величиною обернено пропорційною до ПО, побудуємо (рис. 6.16) залежність саме виміряного УО від ПО свердловини ( $r_C = 0.216$  м) для заданого ПО пласта, яке для визначеності ми поклали рівним 100 Ом·м, що відповідає моделі ущільненого пласта без проникнення.

Очікувано, ця залежність є значною в області, що відповідає соляним розчинам (малі значення ПО бурового розчину). Але для малого зонда комплексу І0.5 залежність зберігається і для глинистих розчинів (ПО більше 0.5 Ом·м). Навіть при ПО бурового розчину більше 2 Ом·м, для яких відповідні залежності інших зондів комплексу є майже лінійними (УО не залежить від ПО бурового розчину), залежність для зонда І0.5 далека від лінійної.

Зазначимо, що отриманий результат описує залежності і при наявності каверн, адже наявність каверни завжди можна описати зменшенням значення



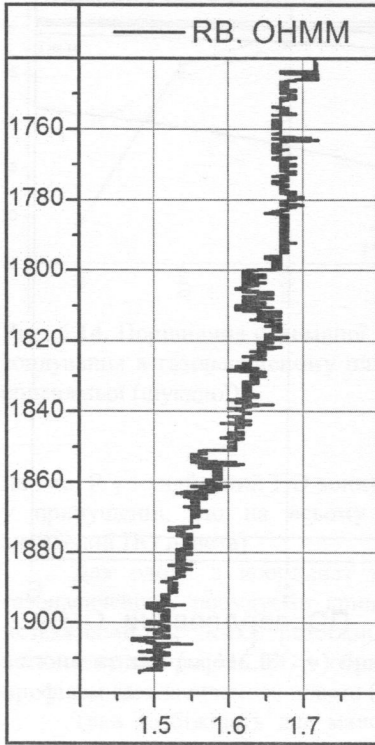


Рис. 6.17. Приклад кривої резистивіметрії (Ватинське родовище)

свердловини частини пласта – ПО зони. Похибка визначення ПО пласта менша, хоча і значна порівняно з похибкою визначення цього параметра при вірному завданні ПО бурового розчину.

Результат розв'язання в припущенні, що весь інтервал є непроникним, (рис. 6.13.д) мало відрізняється від подібного (рис. 6.13.в) при вірному завданні ПО бурового розчину.

Окрім чутливості результату до параметрів провідності ближньої від стінки свердловини частини пласта, є інша особливість, що впадає в очі.

А саме спотворення результату в околі границь пластів. Проте, якщо в задачі ЕК, де були присутні нефокусовані зонди, діаграми яких спотворені в таких околах подібним чином і таке спотворення можна віднести на рахунок

ПО бурового розчину (для цього треба розрахувати інтегральний геометричний фактор каверни).

Отже, якщо ми змінюємо значення ПО бурового розчину (чи за наявності каверни), це може призводити до погіршення результатів розв'язання оберненої задачі, що викликано саме чутливістю малого зонда до параметрів ближньої зони, як це показано на рис. 6.16. Крім того, треба пам'ятати, що сам ПО бурового розчину може змінюватись в залежності від глибини (див. рис. 6.17). І така зміна на десяти доли Ом·м на досліджуваному інтервалі може відповідати одиницям (до 5) Ом·м у величині виміряного УО.

Для аналізу цього ми розв'язали обернену задачу для змодельованих кривих (рис. 6.13.г, д) для значення ПО бурового розчину 3 Ом·м. Результат розв'язання у припущенні, що весь інтервал проникний, представлено на рис. 6.13.г, результат у припущенні відсутності проникнення – на рис. 6.13.д.

Як і очікувалось, більш неточним виявилось визначення параметра провідності ближньої до стінки

свердловини частини пласта – ПО зони. Похибка визначення ПО пласта менша, хоча і значна порівняно з похибкою визначення цього параметра при вірному завданні ПО бурового розчину.

Результат розв'язання в припущенні, що весь інтервал є непроникним, (рис. 6.13.д) мало відрізняється від подібного (рис. 6.13.в) при вірному завданні ПО бурового розчину.

Окрім чутливості результату до параметрів провідності ближньої від стінки свердловини частини пласта, є інша особливість, що впадає в очі.

А саме спотворення результату в околі границь пластів. Проте, якщо в задачі ЕК, де були присутні нефокусовані зонди, діаграми яких спотворені в таких околах подібним чином і таке спотворення можна віднести на рахунок

особливостей форми діаграми градієнт-зонда біля границі пластів, то діаграми наведених зондів ІК (рис. 6.13.а) не мають особливостей подібної форми в околах границь пластів. Крім того, у задачі ЕК такі «піки» спостерігались і на кривій ПО пласта, і на кривих ПО зони, в той же час для наведених результатів для ІК ці «піки» виникають тільки на кривих ПО зони.

Отже, постає питання: звідки беруться ці характерні «піки» в околах границь пластів? Причому чим сильніша різниця між провідностями сусідніх пластів, тим більшу амплітуду має такий пік (6.13.б, г).

Одразу відзначимо, що наведені результати спеціально були отримані без попередньої факторизації, яка описана в п. 6.1, для того щоби окремо проаналізувати радіальні характеристики методу 4ІК. Тому згадуваним явищем Гіббса ці «піки» пояснити не можна.

Відповідь на поставлене питання криється в дослідженні похідної за координатою  $z$  кривих зондів різної довжини (різного вертикального геометричного фактора) біля границі пластів. Дійсно, криві УО зондів малої довжини мають більш різку форму і їх кут змінюється від 0 до  $\pi/2$ . Для зондів більшої довжини кут змінюється повільніше і в меншому діапазоні. Отже, в околі границі пласта ми отримаємо характерний розрив в швидкостях зміни значень УО зондів, який зумовлює виникнення піка (наприклад, координата 2100 м на рис. 6.13 відповідає границі глинистого та ущільненого пластів).

Встановивши факт можливого значного впливу свердловини на розв'язання оберненої задачі, було би корисно окремо дослідити, як впливають на загальний результат й інші фактори (наприклад введення правки "за скін-ефект" чи факторизація), оскільки, зрозуміло, і вони вносять свою похибку в загальний результат.

Виявляється, це здійснено і може бути зроблено на реальному свердловинному матеріалі.

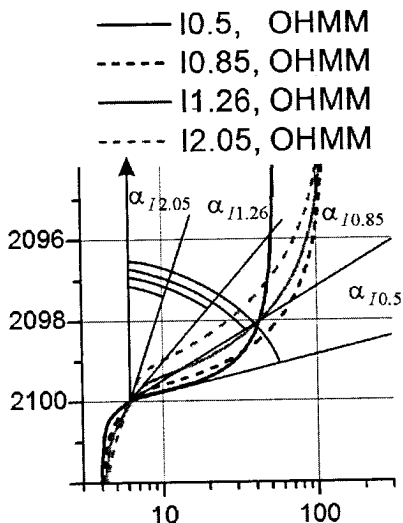


Рис. 6.18. Зміна кута кривих (похідної) УО зондів ІК в залежності від їх довжини в точці положення границі пласта

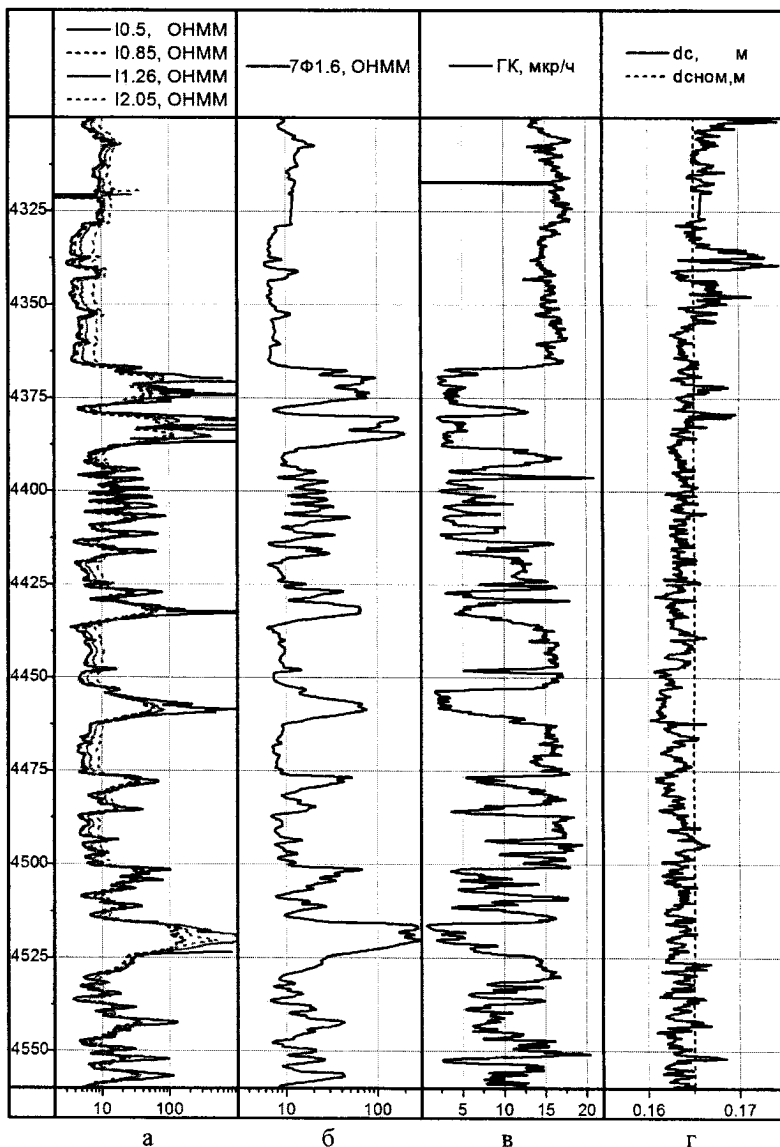


Рис. 6.19. Св. Острорівська. Каротажні діаграми.  
 а – 4ІК; б – 7Φ1.6; в – ГК; г – кавернометрія

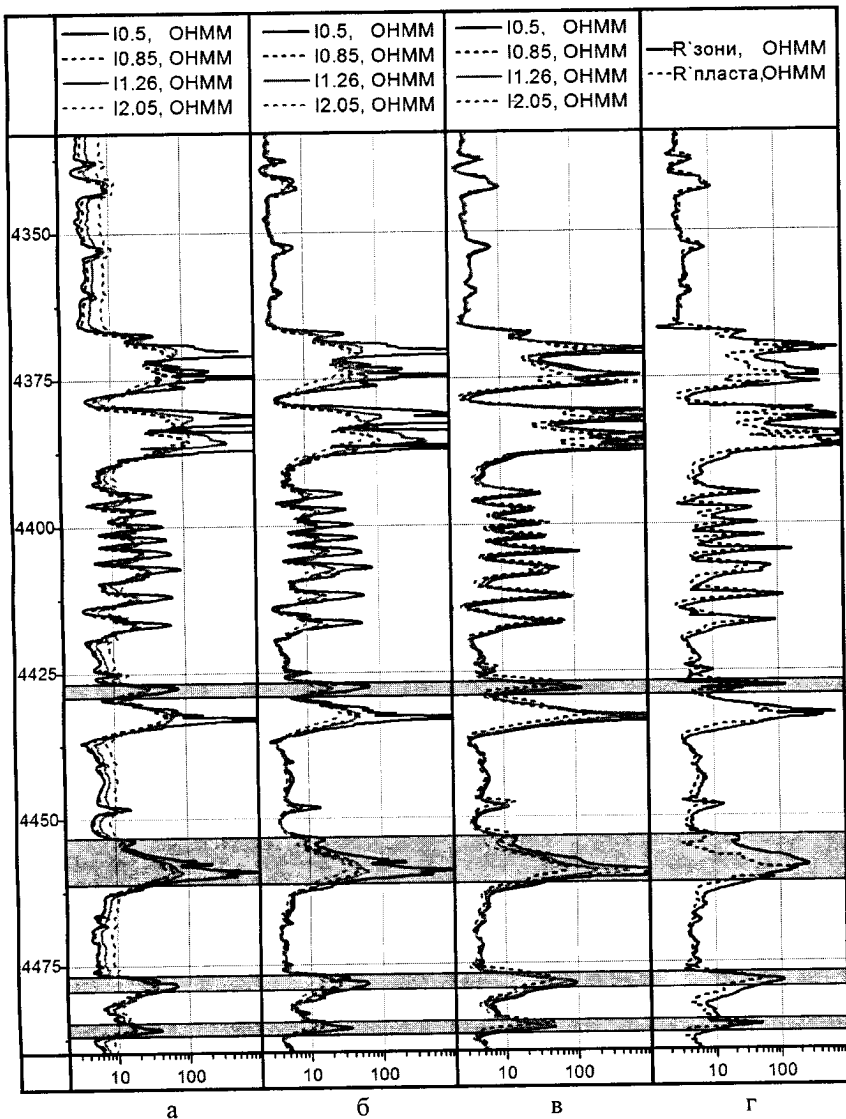


Рис. 6.20. Св. Острорівківська.

а – виміряні УО; б – УО після поправки «за скін-ефект»; в – УО після факторизації; г – результат розв'язання оберненої задачі

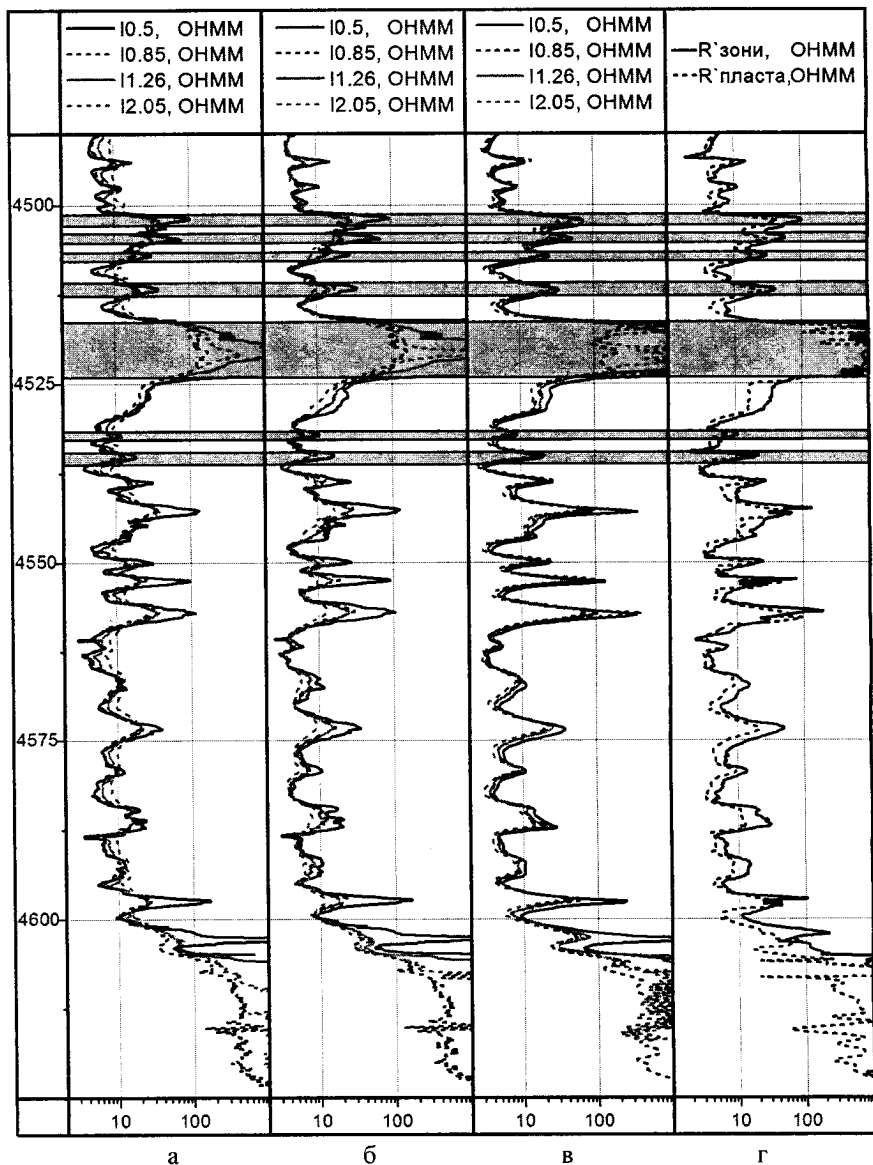


Рис.6.20. (продовження)

Для цього ми розглянемо свердловину з Острозького родовища (рис. 6.19), заповнену буровим розчином на вуглеводневій основі з ПО бурового розчину більше 100 Ом·м, тобто свердловину, у якій не можливе ефективне використання БК чи БКЗ.

Ця свердловина є корисною для розгляду з кількох причин.

По-перше, родовище є досить добре вивченим як методами структурної розвідки (сейсморозвідка), так і методами ГДС: в сусідніх свердловинах виконувався повний деталізаційний комплекс ГДС, тому фільтраційно-ємнісні властивості та дані про характер насичення пластів-колекторів в загальному потенційно відомі.

Це газоконденсатне родовище належить до Північного борту нафтогазоносного району Східного нафтогазоносного регіону України і розташоване в Харківській області на відстані 4 км від м. Мерефа.

По-друге, значення опору бурового розчину (близько 300 Ом·м) та малий діаметр свердловини (номінальний 0.165 м на цьому інтервалі глибин) дозволяють повністю виключити її вплив на розв'язання оберненої задачі і, отже, дослідити кожен з кроків розв'язання оберненої задачі без цього спотворюючого фактора.

Для кривих ІК (рис. 6.20.а) ми спочатку вводимо правку за скін-ефект (рис. 6.20.б). Після введення цієї правки ми вважаємо задачу лінійною (взаємодія струмів в навколосвердловинному середовищі відсутня) і, отже, можемо факторизувати задачу. Результат розв'язання РФ (факторизації) представлений для кривих кожного зонда на рис. 6.20.в.

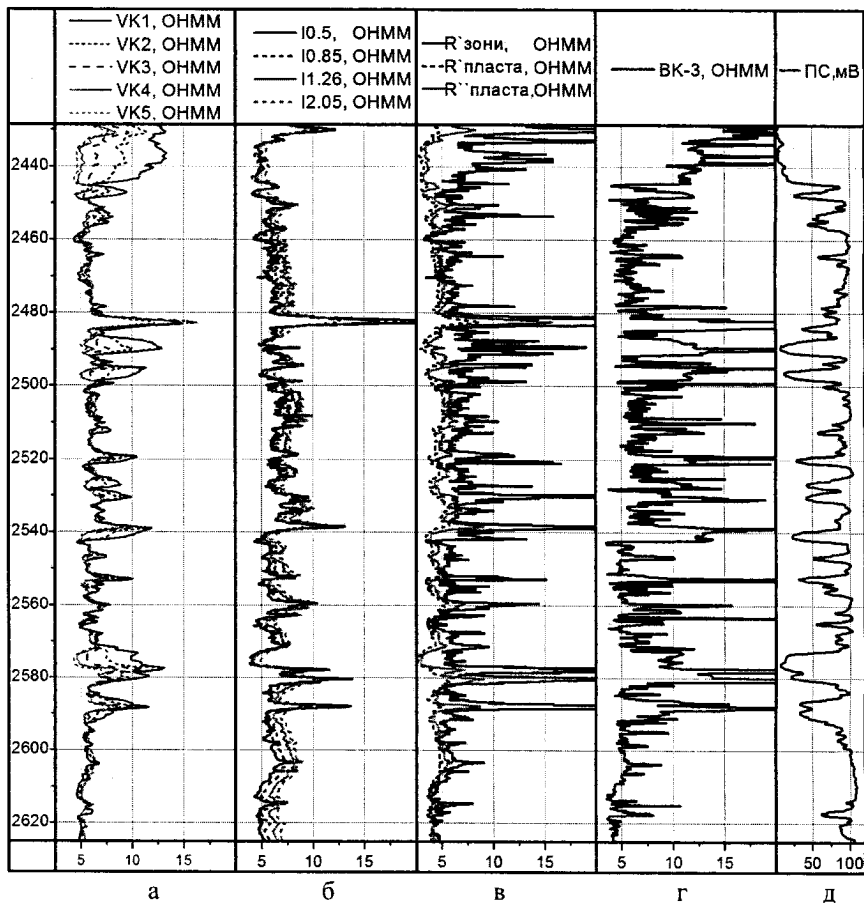
Слід зазначити, що після правки "за скін-ефект" та розв'язання РФ на інтервалах, що містять чергування тонких щільних прошарків різного УО (наприклад 4390-4420 м), криві всіх зондів збігаються, тобто показують вірний тип проникнення. Ми також можемо дослідити реальний робочий діапазон апаратури (фактично калібровку зондів, в тому числі на "ноль у повітрі").

Для аналізу також виділені сірим кольором пласти-колектори (газозні та газонасичені, окрім двох, що знаходяться в інт. 4525-4550, які є водоносними).

Тепер розглянемо іншу свердловину, яку будемо умовно називати "Вингапурівська" (рис. 6.21), що заповнена глинистим буровим розчином.

Порівнювати результати розв'язання оберненої задачі 4ІК будемо з даними високочастотного індукційного каротажного ізопараметричного зондування (ВІКІЗ: криві VK1-VK5 відповідають зондам довжиною 0.5, 0.71, 1.0, 1.41, 2.0 м) та УО зонда БК-3.

Як і раніше, R'зони та R''пласта – ПО, отримані в припущенні, що весь інтервал є інтервалом з проникненням, а R''пласта – ПО, отриманий у припущенні, що весь інтервал є непроникиним.



**Рис. 6.21.** Св. Вингагурівська (ПО бурового розчину 3 Ом·м).

*а* – діаграми ВІКІЗ; *б* – діаграми 4ІК; *в* – результат розв'язання оберненої задачі 4ІК; *г* – діаграма бокового каротажу БК-3; *д* – діаграма ПС

Значення ПО зони добре збігаються з малими зондами ВІКІЗ і БК-3, а ПО пласта – з великими зондами ВІКІЗ.

Отримані результати дозволяють дійти висновку, що в цих умовах комплекс 4ІК більш чутливий до визначення неушкодженої фільтратом бурового розчину частини пласта: значення  $R''$  пласта майже збігається з  $R'$  пласта.

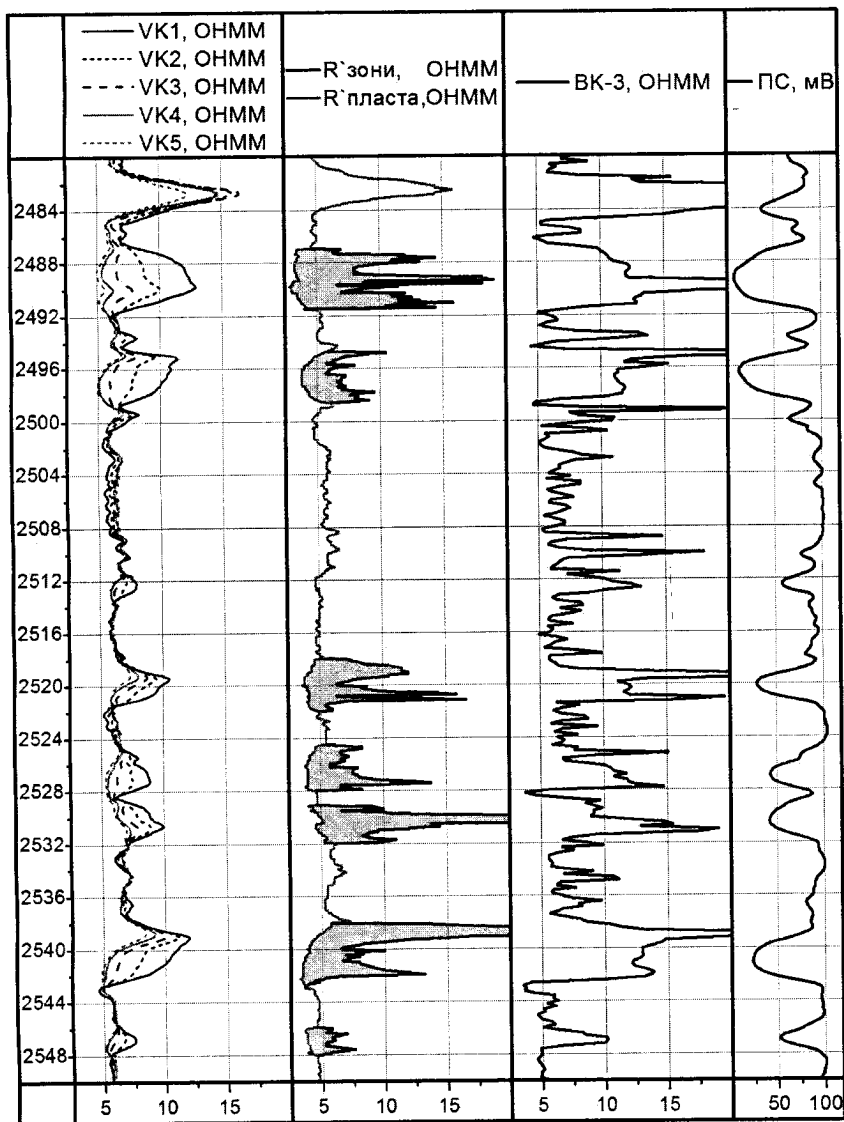


Рис. 6.22. Св. Винаградівська. Результат розв'язання оберненої задачі 4ІК з використанням додаткової інформації про характер проникнення на досліджуваному інтервалі



Але аналогічно з комплексом БКЗ+БК при тому самому підвищуючому проникненні (див. п. 5.3) ми маємо ту саму проблему: зміна ПО зони проникнення виявляється ефектом меншим за впливом, ніж зміна ПО пласта.

Це так само ускладнює процес інтерпретації, оскільки без додаткового матеріалу не можна однозначно встановити параметри проникливості інтервалу – ми завжди маємо два результати розв'язку, кожен з яких отриманий коректно із своєю величиною похибки, які між собою практично не відрізняються.

У цьому випадку ми повинні залучати додаткову інформацію і діяти аналогічним чином, як з БКЗ+БК у п. 5.3 при розв'язанні оберненої задачі для свердловини Північно-Покурська, а саме: розбити досліджуваний інтервал за допоміжними методами на інтервали з проникненням і без нього і на перших вважати результатом розв'язку  $R'$  зони та  $R'$  пласта, а на других – вважати результатом розв'язку  $R''$  пласта.

Саме такий підхід продемонстровано на рис. 6.22. Інтервали з проникненням виділені за ПС та даними інтерпретації ВІКІЗ.

Взагалі кажучи, при сильно-провідних розчинах чи малих значеннях ПО породи введення поправки «за скін-ефект» може призвести до якісно невірному результату. Тому щоразу, коли виникає сумнів в правомочності використання поправки «за скін-ефект» і щоби переконатися у вірності отриманого за допомогою такої поправки результату, досить зробити наступне: отримані в ході розв'язання оберненої задачі з використанням поправки «за скін-ефект» геоелектричні дані розрізу задати в якості граничних умов прямої задачі, яку вирішити з урахуванням взаємодії струмів в середовищі, і для цих даних вирішити обернену задачу. Ступінь збігання результатів вирішення цих двох обернених задач і буде ступенем правомірності використання поправки «за скін-ефект».

# РОЗВ'ЯЗАННЯ СПІЛЬНОЇ ОБЕРНЕНОЇ ЗАДАЧІ ЕЛЕКТРИЧНОГО ТА ІНДУКЦІЙНОГО КАРОТАЖУ

## 7.1. Швидке розв'язання оберненої задачі

Дотепер часу ми розглядали розв'язання оберненої задачі, як щось, що існує само по собі і існує як даність. Проте створення алгоритму розв'язання оберненої задачі і тим більше його числова реалізація потребує значних зусиль, часу і поєднання творчого з науковим підходами. І це навіть у разі наявності реалізованого і протестованого алгоритму розв'язання відповідної прямої задачі, який (див. рис. 1.2.) так чи інакше використовується на кожному кроці ітераційного процесу розв'язання оберненої.

Реалізовувати розв'язання оберненої задачі слід починати з формалізації вимог до відповідного алгоритму.

Вимога точності зрозуміла, і багато в чому можливість її виконання залежить від точності наявного алгоритму розв'язання прямої задачі. Вважаючи, що точність не викликає сумніву, зосередимось на іншій вимозі — швидкості процесу розрахунку: фактично швидкості мінімізації функціонала нев'язки (5.1.4).

Для початку побудуємо таблицю, що пов'яже значення компонентів векторів з області геоелектричних параметрів моделі з компонентами векторів з області даних виміру.

У випадку тришарової моделі таблицю, що пов'яже  $\rho_3 / \rho_C, D/d,$   
 $\rho_{II} / \rho_C$  з набором УО  $\rho_i / \rho_C, i = \overline{1, n},$  де  $n$  — кількість зондів комплексу (для зручності і без обмеження загальності одразу покладемо  $\rho_C = 1$  Ом·м). Фактично побудова кожного рядка таблиці вимагає розв'язання принаймні

однієї прямої задачі. Для комплексу, що складається із зондів БКЗ, зонда БК (БК-3) та зонда ІК (6Ф1 чи 7Ф1.6 чи будь-якого іншого, що використовується в такій зв'язці) для отримання одного рядка нам доведеться розв'язувати три прямі задачі. Спочатку задавши параметри пласта нескінченної потужності  $\rho_3$ ,  $D/d$ ,  $\rho_{II}$ , ми розв'язуємо пряму задачу ЕК для геометрії БКЗ, потім для геометрії БК, а потім задачу ІК. Відповідно  $j$ -й рядок буде мати вигляд:

$$\rho_3^j, (D/d)^j, \rho_{II}^j, \rho_{A0.4M0.1M}^j, \dots, \rho_{A8.0M1.0M}^j, \rho_{BK-3}^j, \rho_{7F1.6}^j (\rho_{6F1}^j).$$

Як правило, прийнято будувати таблицю в бі-логарифмічному масштабі. Після побудови такої таблиці вже фактично можна реалізувати алгоритм найпростішого розв'язання оберненої задачі.

А саме перебираючи рядки таблиці, ми обираємо той, для якого наведені УО комплексу найточніше збігаються з фактично вимірними. Параметри  $\rho_3^j$ ,  $(D/d)^j$ ,  $\rho_{II}^j$  з цього рядка і будуть обрані в якості шуканих параметрів нашої моделі. Перебір можна реалізувати автоматично, а критерій "найточнішої збіжності" буде виглядати як мінімізація функціонала (5.1.4), який запишемо ще раз:

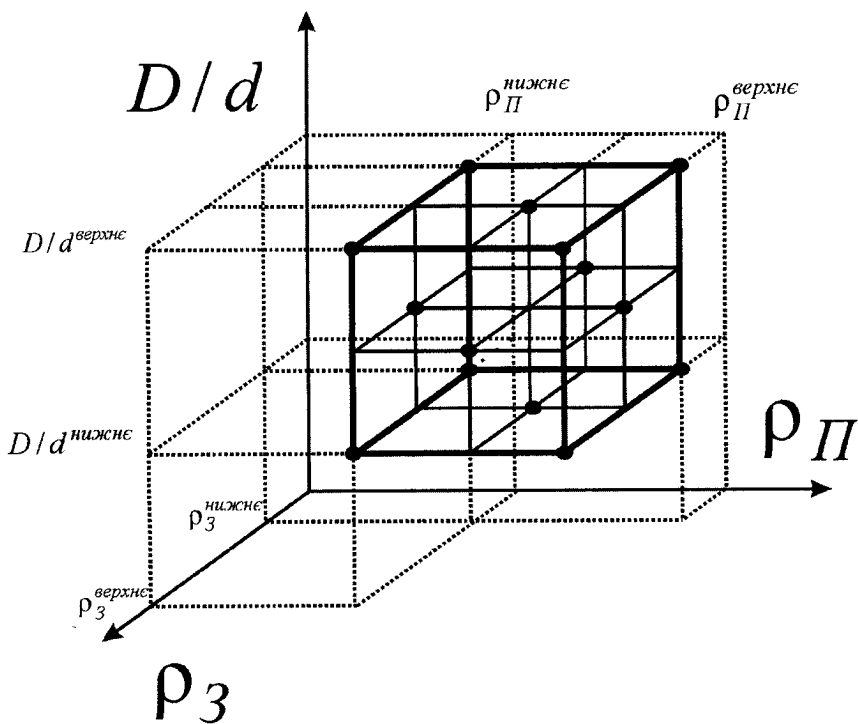
$$F(\rho_1^T, \dots, \rho_n^T) = \sqrt{\sum_{i=1}^n K_i \left( \frac{\rho_i^T - \rho_i^P}{\rho_i^T} \right)^2}, \quad (7.1.1)$$

де  $K_i$  – вагові коефіцієнти кожного зонда комплексу, які можуть змінюватись інтерпретатором.

Саме такий спосіб реалізується в багатьох програмах інтерпретації даних електрометрії. При достатньо щільному заповненні таблиці він дає непоганий результат, похибка якого є порівняною з похибкою каротажу. А при сучасному розвитку засобів обчислювальної техніки і за наявності заздалегідь розрахованої відповідної таблиці сам процес розв'язання оберненої задачі для інтервалу в 1000 м по осі свердловини становитиме доли секунд.

Проте такий алгоритм має кілька недоліків.

Перший: його точність обмежена кроком перебору параметрів  $\rho_3$ ,  $D/d$ ,  $\rho_{II}$ . Другий: великий об'єм таблиці вимагає значних обчислювальних ресурсів і збільшує час розв'язання.



**Рис. 7.1.** Ілюстрація подрібнення області параметрів пласта. Виділено точки, для яких розв'язується пряма задача на  $n+1$  кроці ітерації

Для трьох параметрів, при переборі  $\rho_z$ ,  $\rho_{II}$  по 1000 значень, а  $D/d$  – двадцять, ми будемо мати 20000000 рядків в таблиці. Це ще можна розглядати як варіант для тришарової моделі, але вже для чотиришарової такої підхід виявляється нерациональним і таким, який занадто важко реалізувати.

Проте ми будемо використовувати таку таблицю. Навіть таблиця з 5 значеннями для  $D/d$  і по 50 для  $\rho_z$ ,  $\rho_{II}$  (1250 рядків у таблиці) значно полегшує і прискорює подальше розв'язання (для чотиришарової моделі при кількості можливих варіантів зміни параметрів промитої зони (відповідно 5 для діаметра і 50 для її ПО) ми будемо мати таблицю всього з 312500 рядків).

Ця таблиця нам буде потрібна для побудови першого наближення в подальшому процесі ітераційної мінімізації (7.1.1).

Ітераційний процес побудуємо наступним чином. Оберемо перше наближення шуканих параметрів у вигляді діапазону:

$$\rho_3^{\text{нижнє}} < \rho_3 < \rho_3^{\text{верхнє}}, \quad (7.1.2)$$

$$D/d_3^{\text{нижнє}} < D/d < D/d_3^{\text{верхнє}}, \quad (7.1.3)$$

$$\rho_{II}^{\text{нижнє}} < \rho_{II} < \rho_{II}^{\text{верхнє}}. \quad (7.1.4)$$

На наступному кроці поділимо задану таким чином область (7.1.2)-(7.1.4) площинами (див. рис. 7.1):

$$\rho_3 = \rho_3^{\text{нижнє}} + 0.5 \cdot (\rho_3^{\text{верхнє}} - \rho_3^{\text{нижнє}}), \quad (7.1.5)$$

$$D/d = D/d_3^{\text{нижнє}} + 0.5 \cdot (D/d_3^{\text{верхнє}} - D/d_3^{\text{нижнє}}), \quad (7.1.6)$$

$$\rho_{II} = \rho_{II}^{\text{нижнє}} + 0.5 \cdot (\rho_{II}^{\text{верхнє}} - \rho_{II}^{\text{нижнє}}), \quad (7.1.7)$$

на вісім областей. Тепер розв'яжемо прямі задачі у вершинах паралелепіпеду, що утворений (7.1.2)-(7.1.4); у точках перетину площин (7.1.5)-(7.1.7) на гранях паралелепіпеду всього 13 (у одній точці ми маємо розв'язок з попереднього кроку ітерації) точок (див. рис. 7.1).

Кожна з восьми областей утворює монотонну область в просторі значень  $\tilde{\rho}_i^T$ . Обираємо з них ту, в яку потрапляють значення  $\tilde{\rho}_i^P$ . Вершини цієї області обираємо як границі інтервалів (7.1.2)-(7.1.4) наступного кроку ітераційного процесу:  $\rho_3^{\text{нижнє}}, \rho_3^{\text{верхнє}}, D/d_3^{\text{нижнє}}, D/d_3^{\text{верхнє}}, \rho_{II}^{\text{нижнє}}, \rho_{II}^{\text{верхнє}}$ .

Продовжуємо цей процес, поки для заданого наперед значення величини нев'язки  $\varepsilon$  не виконається умова:

$$F(\rho_1^T, \dots, \rho_n^T) = \sqrt{K_i \sum_{i=1}^n \left( \frac{\rho_i^T - \rho_i^P}{\rho_i^T} \right)^2} < \varepsilon,$$

або якщо значення функціонала не перестане зменшуватись, що можливо, оскільки при перевизначенні задачі мінімум функціонала не обов'язково буде дорівнювати нулю.

Область (7.1.2)-(7.1.4) для першого кроку ітераційного процесу ми будемо з нашої заздалегідь розрахованої таблиці, взявши в якості граничних

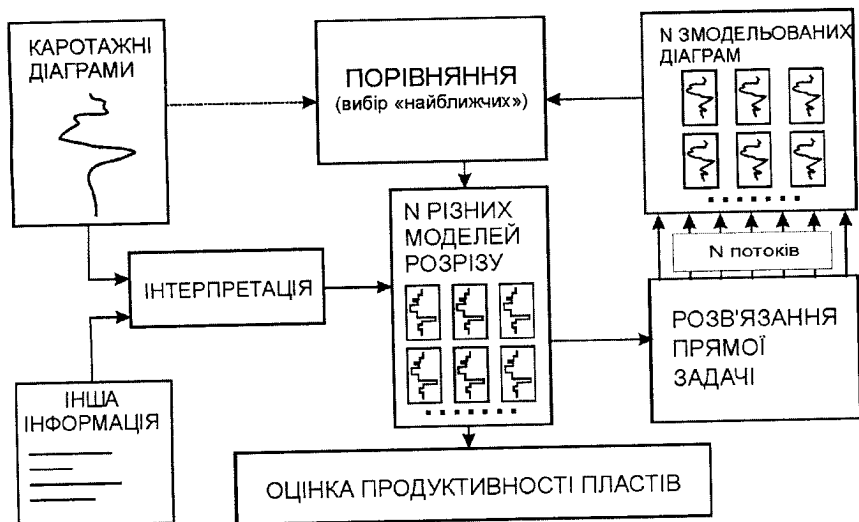


Рис. 7.2. Схема розв'язання оберненої задачі

значень найближчі, але не рівні між собою параметри моделі з рядків, які дають найменші значення (7.1.1).

Щодо процесу розв'язання такої кількості прямих задач, то тут слушно використовувати так звані потоки (stream). Тобто використовувати широко доступну зараз можливість одночасного розв'язання декількох математичних задач. Використання потоків приводить до того, що майже за один і той самий час ми замість розв'язання однієї прямої задачі розв'язуємо декілька (кількість яких визначається, зрозуміло, обчислювальними потужностями використовуюваного комп'ютера).

Це виявляється зручним, оскільки для кожної точки, у випадку розв'язання оберненої задачі БКЗ+БК+ІК, ми повинні розв'язувати по три прямих задачі: одна задача ЕК для БКЗ, одна задача ЕК для БК і одна задача ІК.

Крім того, автор використовує know-how, що дозволяє суттєво зменшити кількість точок, в яких розв'язується система (7.1.5)-(7.1.1).

## 7.2. Розв'язання оберненої задачі БКЗ+БК+ІК

Фактично ми вже розглянули комплекс, що складався з А0.4М0.1N, А1.0М0.1N, А2.0М0.5N, N6.0М0.5A, А4.0М0.5N, А8.0М.0N, БК-3 та одного

зонда ІК, а саме 7Ф1.6. Тоді, у п. 5.3 глави 5, ми навели приклад, коли додавання зонду ІК до комплексу БКЗ+БК покращувало загальний результат розв'язання оберненої задачі. Наведений приклад був отриманий на модельному матеріалі.

Розглянемо тепер реальний матеріал. Почнемо із свердловини (рис. 7.3), що заповнена глинистим буровим розчином з ПО, що дорівнює  $\rho_C = 1.2-1.3 \text{ Ом}\cdot\text{м}$  на досліджуваному інтервалі.

У цій свердловині у нас для порівняння є дані ВКІЗ. З допоміжних методів розглянемо ПС.

На досліджуваному інтервалі присутні тонкошаруваті високоомні ущільнені пласти, що добре видно як по кривих БК-3, так і по кривих ВКІЗ.

Фактор наявності таких пластів демонструє іншу особливість спільного розв'язання БКЗ+БК+ІК: додавання зонда ІК може не тільки покращувати загальний результат, але і погіршувати. Дійсно, для тих моделей, параметри яких виходять за робочий діапазон зонда ІК, його дані не надають корисної інформації, а тільки навпаки додають зайву, що може призводити до суттєвої втрати точності.

Цю особливість треба брати до уваги і, взагалі кажучи, мати можливість виділяти такі інтервали так, щоби саме в них зонд ІК не брав участі у розв'язанні оберненої задачі.

Тут і надалі ми не будемо цього робити для того щоби надавати читачу щоразу реальний результат розв'язання оберненої задачі без втручання людського фактора, хоча, зрозуміло, що у програмі, в якій реалізовано цей і подібні алгоритми розв'язання оберненої задачі, наявна така можливість вибору окремих інтервалів і навіть точок, в яких в ручному режимі можна вказати той чи інший набір зондів для роботи (і крім того, для кожного окремо на цьому інтервалі задати свої вагові коефіцієнти для мінімізації (7.1.1)).

Ми розв'яжемо дві обернені задачі, одна – в припущенні проникнення на всьому інтервалі (включно з високоомними ущільненими пластами), друга – в припущенні, що інтервал є непроникним. На рис. 7.3.  $R'$  зони та  $R'$  пласта – ПО, отримані в припущенні, що весь інтервал є інтервалом з проникненням, а  $R''$  пласта – ПО, отриманий у припущенні, що весь інтервал є непроникним.

Взагалі кажучи, якщо ми маємо дев'ять зондів і для кожного з них можемо обирати будь-яке значення вагових коефіцієнтів, то можна отримати безліч варіантів розв'язків.

Така можливість, з одного боку, для кожного конкретного прикладу розрізу, в якому є інший комплекс для порівняння, може нівелювати твердження, що для цього випадку обернена задача розв'язана успішно, адже маючи можливість змінювати результат, "граючись" ваговими коефіцієнтами

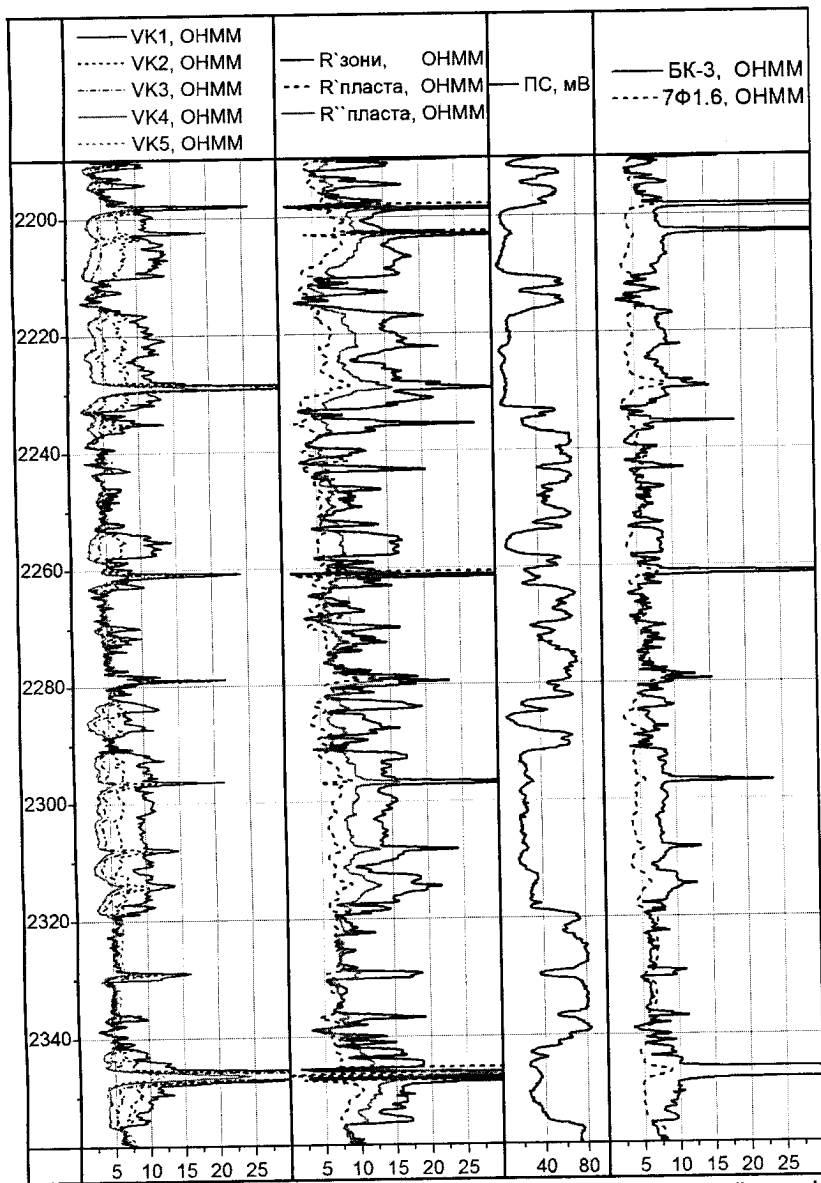


Рис. 7.3. Св. Північно-Покурська. Результат розв'язання оберненої задачі для БК3+БК+ІК.



та маючи з чим порівнювати остаточний результат, ми навіть мимоволі можемо до нього наблизитись.

З іншого боку, навпаки, набираючи статистичні дані роботи для різних моделей різних розрізів, ми поступово складаємо алгоритм визначення вагових коефіцієнтів для кожного випадку так, щоби розв'язок був якомога точнішим.

Розглянутий приклад свердловини Північно-Покурської надав тільки перший важливий факт для такого алгоритму: в інтервалах, що містять високоомні пласти (малої потужності), завжди покладати  $K_{7F1.6} = 0$ . Особливо на таких інтервалах, як 2352-2355, де БК-3 записав майже 1500 Ом·м. В інших ущільнених і непроникних пластах наведеного інтервалу БК-3 давав значення 50-60 Ом·м, що, з одного боку, належить до робочого діапазону зонда 7Ф1.6, але, з іншого, дані цих вимірів були отримані не в пластах нескінченної потужності. Зрозуміло, що в тонких шарах завдяки впливу вміщуючих порід та тому факту, що ІК – це є каротаж провідності, а не опору – значення його робочого діапазону ПО будуть набагато вужчі у малопотужних пластах.

Додавання зонду ІК виявило цікаву особливість розв'язання оберненої задачі: якщо порівняти отримані результати на рис. 7.3 та рис. 5.24, то крива R'' пласта (тобто ПО, отриманий у припущенні, що весь інтервал є непроникним) на рис. 5.24 ближче до 5.24.в, ніж до 5.24.б. Тобто зонд 7Ф1.6 нібито замінив зонди А4.0М0.5N, А8.0М1.0М з точки зору радіальної роздільної здатності комплексу. Це свідчить про те, що навіть при підвищуючому проникненні комплекс однаково "відчуває" і зміну ПО зони, і зміну ПО пласта.

На рис. 7.3. представлені результати розв'язання оберненої задачі з ваговими коефіцієнтами  $K_{7F1.6} = 5$ ,  $K_{БК-3} = 5$ . Такий вибір був обумовлений тим, що саме ці зонди, у порівнянні з потенціал-зондами та градієнт-зондами, мають краще співвідношення "вертикальна роздільна здатність/глибина дослідження". Так у нас з'явилась краща диференційованість кривих. Крім того, як вже було відмічено, в такому вигляді метод все ж таки відчуває високоомні ущільнені пласти (у порівнянні з БК3+БК, див. рис. 5.24). Але все одно, вертикальна роздільна здатність визначається в основному зондами БК3.

Стосовно вертикальної роздільної здатності, варто відмітити також більшу вертикальну диференційованість кривої малого зонда ВІКІЗ. Але оскільки така диференційованість навіть вища, ніж у БК-3, який за визначенням має високу вертикальну роздільну здатність, то цей факт слід інтерпретувати як чутливість малого зонда ВІКІЗ до каверн, які наявні у свердловині. При ПО бурового розчину  $\rho_c = 1.2-1.3$  Ом·м зонд БК-3,

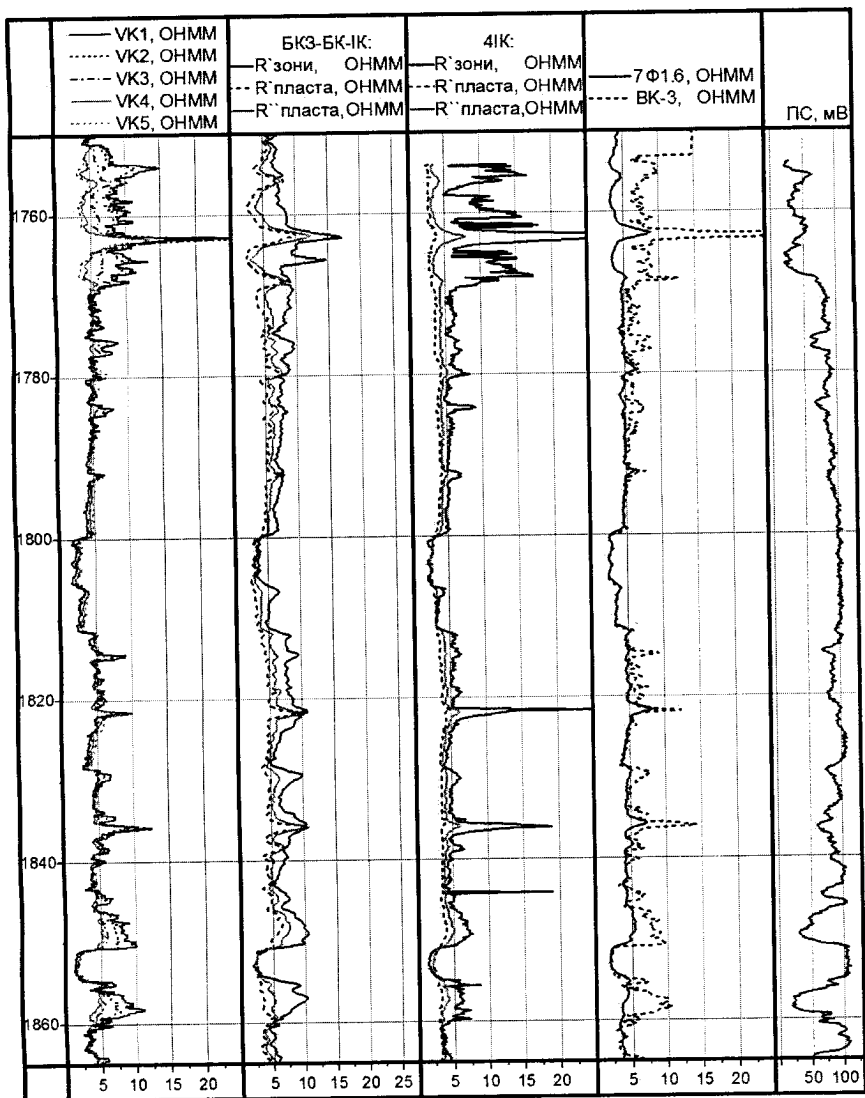


Рис. 7.4. Св. Ватинська. Результат розв'язання оберненої задачі для комплексу БКЗ+БК+ІК

очевидно, майже не "відчуває" наявність тріщин і каверн в стінках свердловини.

Також не можна не відмітити, що на інтервалах, де має бути відсутнє проникнення, отримані значення ПО зони і ПО пласта ближче одне до одного, ніж на відповідних інтервалах, але отримані тільки комплексом БКЗ+БК (рис. 5.24). Для дослідження цього явища нам замало однієї свердловини, тим більше свердловини, в якій з методів електрометрії для порівняння є тільки ВКІЗ.

Взагалі, як для тестування прямих задач справедливе твердження "чим більше перевірок – тим краще", те саме можна сказати і про тестування обернених задач, додавши один важливий нюанс: "чим більше порівнянь – тим краще, а ще краще, якщо порівнюється якомога більша кількість інших методів електрометрії".

Так, на попередньому прикладі ми мали для порівняння фактично тільки ВКІЗ. Розглянемо іншу свердловину, в якій ми матимемо для порівняння і ВКІЗ, і 4К (із вже отриманим результатом відповідної оберненої задачі). З допоміжних методів розглянемо ПС.

Ця свердловина (рис. 7.4), умовно названа "Ватинська", також заповнена глинистим буровим розчином з ПО, що дорівнює  $\rho_c = 1.55-1.66$  Ом·м на досліджуваному інтервалі.

На інтервалі присутній високоомний ущільнений пласт (1763-1764 м), який прописується всіма методами. Як вже було відмічено при розгляді попереднього прикладу, якщо ваговий коефіцієнт  $K_{7F1.6}$  на цьому інтервалі не дорівнює нулю, то значення ПО, що встановлюються, можуть виявитись нижчими у порівнянні з іншими методами, що ми і маємо в нашому випадку (оскільки домовились не змінювати вагові коефіцієнти для наочності впливу їх значень на результат розв'язання оберненої задачі).

Дослідимо інтервали, в яких майже відсутнє проникнення за ВКІЗ. На одному з таких потужних інтервалів, а саме на 1785-1815 м, криві БК-3 та 7Ф1.6 також збігаються. Криві R`зони, R`пласта та R``пласта, визначені за БКЗ+БК+ІК, збігаються тільки на інтервалі 1800-1805 м, за методом 4К – на трохи більшому інтервалі 1800-1812 м. На решті глибин, що за БКЗ+БК+ІК, що за 4К, R``пласта лежить ближче до R`пласта, ніж до R`зони, що може означати наявність невеликої зони, тобто зони, до зміни ПО якої ці комплекси набагато менш чутливі, ніж до зміни ПО пласта. Наявна величина розходження кривих ВКІЗ в цих інтервалах не суперечить такому висновку.

Також є два низькоомні інтервали, на яких всі методи демонструють відсутність проникнення: 1850-1855 м та 1860-1865 (на цьому БКЗ+БК+ІК демонструє невеличке проникнення).

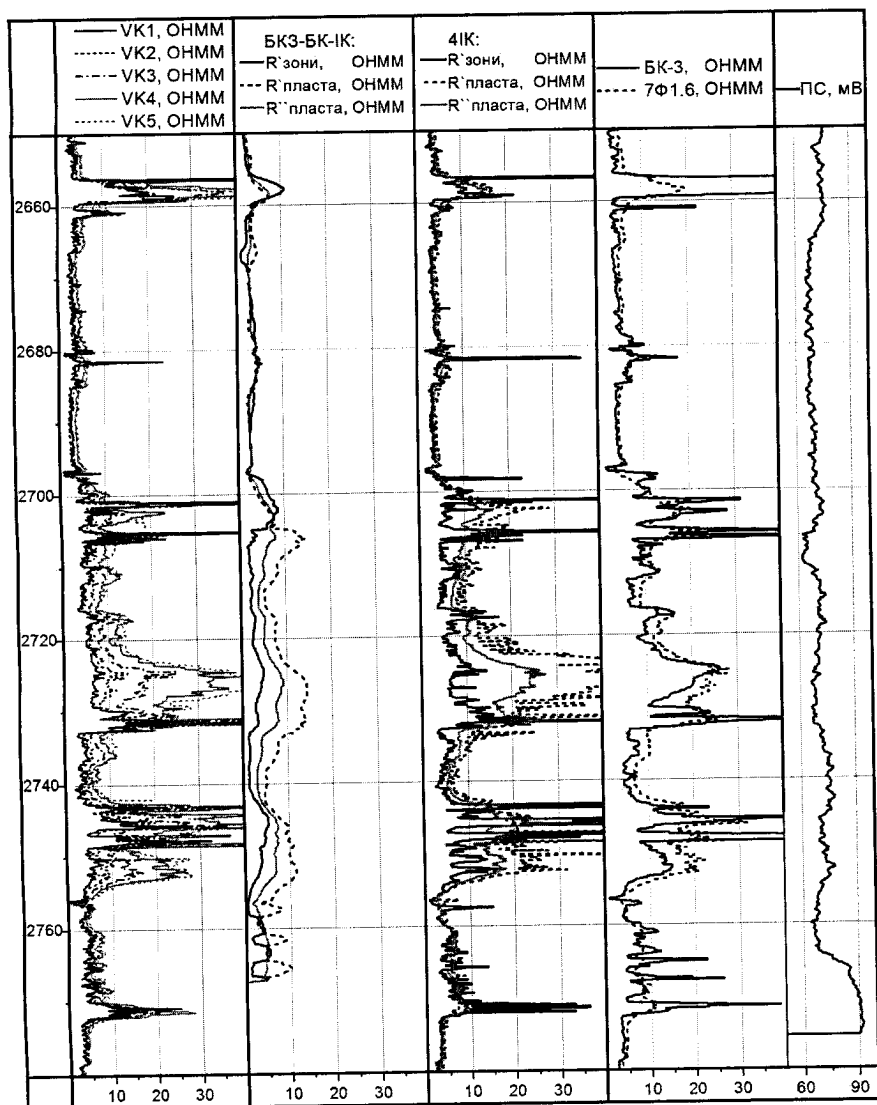


Рис. 7.5. Св. Станська. Результат розв'язання оберненої задачі для БКЗ+БК+ІК

Таким чином, можна дійти висновку, що в даному випадку визначення ПО низькоомних пластів є ефективним і таким, що не спотворюється наявністю зон проникнення вищого значення ПО, але малого діаметра ( $D/d < 2.5$ ).

При більших значеннях  $D/d$ , там, де починають значно відрізнятись УО за БК-3 та 7Ф1.6, починає зростати і різниця між  $R'$  пласта та  $R'$  зони, як по БКЗ+БК+ІК, так і по 4ІК (1760-1770 м, 1810-1820 м, 1830-1840 м).

На інтервалах, які виділяються і за ПС, і за ВІКІЗ, як такі, що мають проникнення і велику зону, добре виділяються одночасно і по БКЗ+БК+ІК, і по 4ІК (1750-1770 м, 1845-1850 м, 1855-1860 м). Але характерним для цих інтервалів є також той факт, що  $R'$  пласта лежить ближче до  $R'$  пласта, ніж до  $R'$  зони. Це вказує на помірні значення діаметра зони  $5.5 > D/d > 2.5$ . Винятком є інтервали високих значень ПО там, де  $R'$  пласта значно збільшується слідом за  $R'$  зони при майже незмінному  $R'$  пласта, наприклад на 1763-1765 м.

Взагалі, той факт, що на високоомних прошарках збільшується визначене  $R'$  зони при майже незмінному  $R'$  пласта свідчить про низьку вертикальну роздільну здатність методу для віддалених від стінки свердловини частин пласта при підвищуючому проникненні, що, на жаль, так і є (чому саме при цьому типі проникнення буде показано у наступній главі 8). Але цей факт в даному випадку не вказує на те, що ПО зони отримано з меншою точністю. Для такого твердження необхідно досліджувати так звані характеристики просторової роздільної здатності, що також буде зроблено у наступній главі.

Розглянувши дві свердловини з глинистим розчином, ми можемо якісно розширити матеріал для випробування алгоритму розв'язання оберненої задачі БКЗ+БК+ІК, використавши матеріал, отриманий у свердловині з умовною назвою "Єганська" (рис. 7.5), що заповнена соляним розчином з ПО, що дорівнює  $\rho_C = 0.34$  Ом·м.

На інтервалі присутні два високоомні пласти з ПО більше 200 Ом·м (2656-2660 м та 2746-2749 м). Як і у двох попередніх прикладах, визначені ПО за комплексом БКЗ+БК+ІК не відображають ці значення. Проте їх набагато краще відображає комплекс 4ІК. Може виникнути питання, чому комплекс, в якому є тільки один зонд ІК, має гірші характеристики визначення ПО високоомних пластів, ніж комплекс, що складається тільки з зондів ІК?

Відповідь проста і складається з двох частин.

По-перше, в комплексі БКЗ+БК+ІК присутні зонди, вертикальна роздільна здатність яких в принципі унеможливує точне дослідження

пластів малої потужності (див. гл. 5). Насправді в цьому комплексі є всього два зонди високої вертикальної роздільної здатності: БК-3 та 7Ф1.7, інші – або мають невелику глибину дослідження і, як наслідок, їх дані сильно екрануються свердловиною, або мають низьку вертикальну роздільну здатність.

По-друге, при розв'язанні оберненої задачі для комплексу 4ІК ми використовуємо факторизацію, що значно підвищує вертикальну роздільну здатність зондів ІК таким чином, що вона не залежить від довжини зонда, а обмежена тільки величиною кроку запису (див. гл. 6).

Інша відмінність від двох попередніх свердловин: краща збіжність кривих  $R'$  зони,  $R'$  пласта та  $R''$  пласта, ніж кривих різноглибинних зондів ВКІЗ на інтервалах, що є підозрілими на відсутнє проникнення (2668-2695 м). Причому за комплексом БКЗ+БК+ІК вони збігаються навіть більше, ніж криві УО зондів БК-3 та 7Ф1.6.

На проникних пластах і комплекс БКЗ+БК+ІК, і комплекс 4ІК демонструє правильний його характер: понижуюче проникнення, що характерно для свердловин, заповнених соленим буровим розчином.

Також ми бачимо іншу відмінність від матеріалу, що отриманий у свердловинах, заповнених глинистим буровим розчином: крива  $R''$  пласта вже не повторює тільки  $R'$  пласта. Навпаки, вона виглядає як щось середнє між  $R'$  зони та  $R'$  пласта. Це вказує на те, що розв'язок оберненої задачі для цього типу проникнення є однаково чутливим і до зміни ПО зони, і зміни ПО пласта.

Також ми бачимо, що на інтервалах, на яких індукційні методи ВКІЗ і 4ІК демонструють збільшення ПО зони до 30-40 Ом·м, за комплексом БКЗ+БК+ІК  $R'$  зони не дотягує до 15 Ом·м. Це в даному випадку є наслідком того, що вагові коефіцієнти всіх нефокусованих зондів дорівнюють одиниці. Проте, як це випливає з рис. 2.5, при ПО свердловини 0.34 Ом·м таке значення ПО вже знаходиться на межі діапазону зонда А0.4М0.1N, а отже, його участь у мінімізації (7.1.1) з таким самим ваговим коефіцієнтом, як і у більш інформативних зондів (для цих значень  $\frac{\rho}{\rho_c}$ ), погіршує (в цьому випадку зменшує) результат. Картина значно покращується, якщо вручну змінити ці вагові коефіцієнти, проте, як зазначалось, ми наводимо результати без ручного втручання в процес їх отримання. Крім того, значення 4ІК на цьому інтервалі є дещо завищеними, оскільки на цьому інтервалі наявна велика глиниста кірка, і реальний діаметр свердловини виявляється меншим, ніж той, що ми враховуємо при використанні поправки "за свердловину", що призводить до збільшення, в першу чергу, отриманих значень ПО зони.

В цілому використання комплексу БКЗ+БК+ІК надає матеріал для розв'язання їх спільної оберненої задачі, а результат такого розв'язання (із

врахуванням особливостей розрізу при виборі вагових коефіцієнтів при мінімізації (7.1.1)) добре збігається з результатами, що демонструють інші методи електрометрії.

### **7.3. Розв'язання оберненої задачі БКЗ+БК+ІК+4ІК**

Постає резонне питання: якщо маємо розроблені і реалізовані алгоритми розв'язання оберненої задачі для двох комплексів електрометрії БКЗ+БК+ІК та 4ІК, то чому їх не об'єднати в один? Дійсно, якщо ми розв'язували спільну обернену задачу для БКЗ+БК та ІК (зонд 7Ф1.6 чи 6Ф1), то чому не реалізувати спільне розв'язання оберненої задачі для 4ІК+БКЗ+БК+ІК?

Справді, алгоритм розв'язання у нас є. У цьому алгоритмі вже реалізовано за допомогою використання потоків незалежне і одночасне розв'язання прямих задач БКЗ, БК та ІК. Додати до цього процесу ще одне розв'язання прямої задачі 4ІК не викликає алгоритмічних труднощів – винятково технічні.

Навіть таблицю для побудови першого наближення можна отримати шляхом поєднання окремих вже розрахованих таблиць для БКЗ+БК+ІК та 4ІК.

І отже, зробивши ці необхідні доповнення, ми маємо реалізований алгоритм спільного розв'язання оберненої задачі для комплексів 4ІК та БКЗ+БК+ІК.

Чи є обґрунтована необхідність такого розв'язання? Чи не буде це невиправдано ускладнювати процес? Чи не буде накопичуватись похибка при використанні такої кількості зондів (кожен з яких має свою похибку)? Чи є взагалі необхідність в самій постановці проблеми спільного вирішення оберненої задачі об'єданого комплексу БКЗ+БК+ІК+4ІК?

Необхідність однозначно є, оскільки ці комплекси одночасно застосовують у багатьох свердловинах, де умови дозволяють використовувати ІК (тобто свердловини з не занадто соленим буровим розчином) і ЕК (тобто свердловини з не занадто високоомним буровим розчином), як це було, наприклад, у наведених прикладах свердловин Ватинська та Єганська. Інша проблема – не всі сервісні компанії мають 4ІК (на відміну від БКЗ+БК+ІК, який вважається майже обов'язковим). Остання проблема успішно вирішується в останні два десятиріччя постійним доведенням ефективності використання 4ІК у відповідних розрізах і свердловинних умовах.

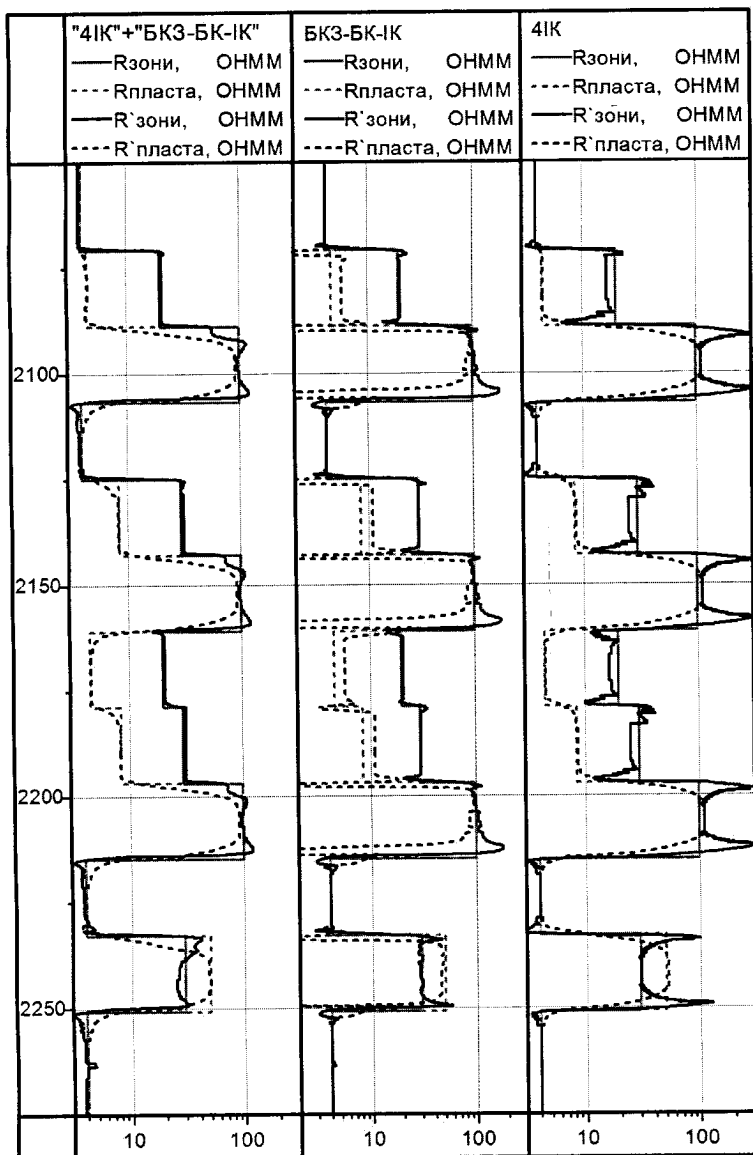


Рис. 7.6. Св. Тестова-1. Порівняння розв'язання оберненої задачі для різних комплексів



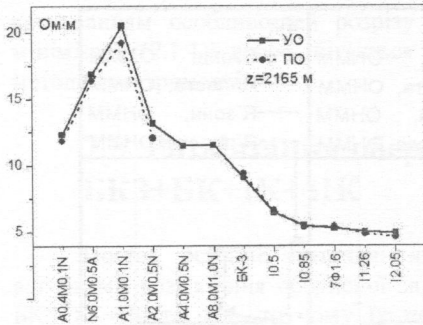


Рис. 7.7. Порівняння отриманої кривої зондування у водонасиченому пласті та справжньої (шуканої)

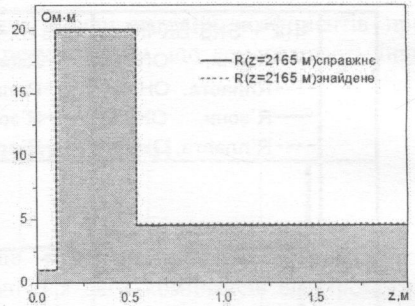


Рис. 7.8. Порівняння справжнього профілю ПО моделі водонасиченого пласта та знайденого профілю ПО

Що стосується інших питань, то розглянемо їх на конкретних прикладах і почнемо з прикладу свердловини Тестова-1.

Легко побачити, що зник кожен з недоліків, притаманних окремому розв'язанню оберненої задачі для комплексу БКЗ+БК+ІК (в цьому випадку всі вагові коефіцієнти, окрім  $K_{A4.0M0.5N}$ ,  $K_{A8.0M1.0N} = 0$ , розглядались як такі, що не дорівнюють нулю) та 4ІК (рис. 7.6).

Наприклад, у спільного розв'язку майже відсутні характерні "піки", що притаманні 4ІК і викликані різною похідною кривих УО для різних зондів в околах точок границь пластів (див. п. 6.3) чи притаманні БКЗ+БК+ІК та викликані формою кривих УО градієнт-зондів в околах тих самих границь.

При цьому для наведеного прикладу  $R'$ зони і  $R'$ пласта збігаються з шуканими  $R$ зони і  $R$ пласта на всьому інтервалі.

Так, на рис. 7.7 наведено одну з можливих кривих зондування (що відповідає водонасиченому інтервалу (отримані значення УО зондів A4.0M0.5N, A8.0M1.0N відсутні через те, що їх вагові коефіцієнти були покладені рівними нулю), а на рис. 7.8 встановлений відповідний цій кривій профіль ПО вздовж пласта. Можна побачити, що при видаленні з умов інверсії двох великих зондів комплексу БКЗ досягається високий ступінь збіжності отриманих та справжніх УО, завдяки чому відтворюється майже 100% і профіль ПО вздовж пласта.

Взагалі кажучи, якщо наведені результати на рис. 7.6. і мають недоліки, то це винятково невелике спотворення результатів в околі точок положення горизонтальних границь пластів, причому таке спотворення є незрівнянно меншим, ніж відповідне, що виникає при окремому розв'язанні оберненої задачі комплексу БКЗ+БК+ІК чи 4ІК.

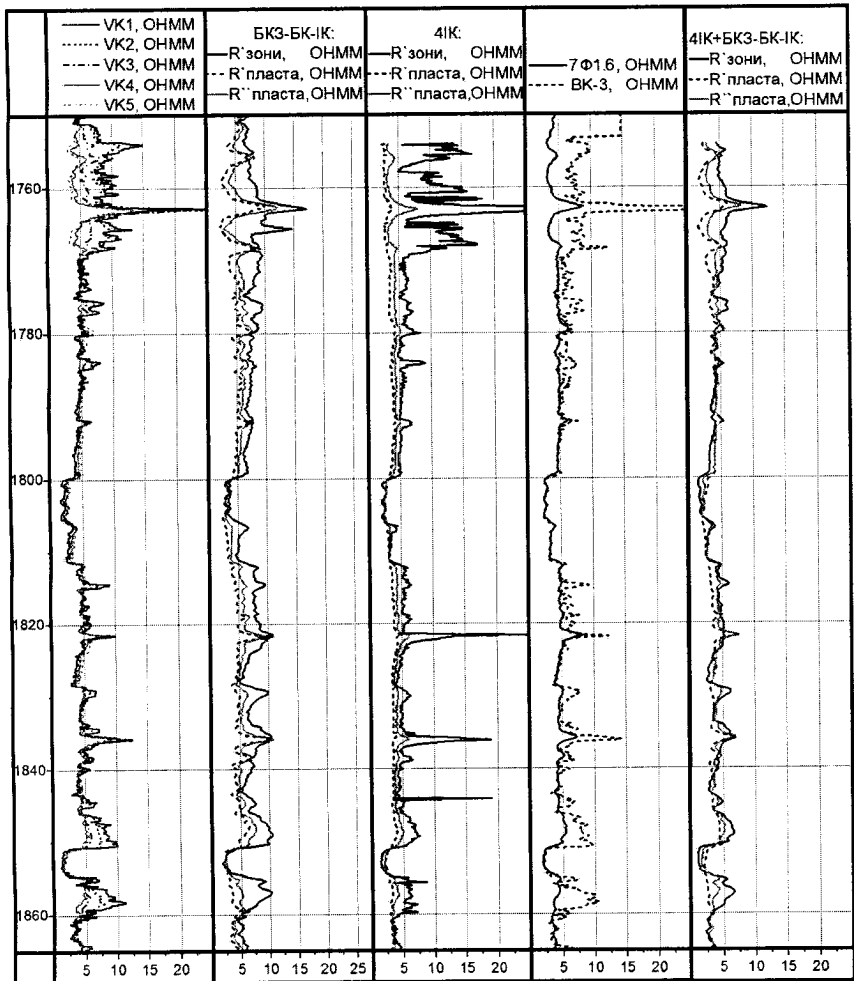


Рис. 7.9. Св. Ватинська. Порівняння розв'язання оберненої задачі для різних комплексів

Перейдемо до реального свердловинного матеріалу, для чого використаємо одну свердловину з глинистим розчином і одну із соленим.

На рис. 7.9. наведено результати для свердловини, що заповнена глинистим буровим розчином з ПО, що дорівнює  $\rho_c = 1.55-1.66$  Ом·м на досліджуваному інтервалі (порівн. див. рис. 7.4.).

Порівнюючи дані з ВІКІЗ та іншими, ми бачимо, що при підвищуючому проникненні комплекс 4ІК+БКЗ+БК+ІК показує менші значення ПО пласта, що є перевагою при дослідженні водонасичених та нафтонасичених колекторів.

Вертикальна роздільна здатність такого комплексу при такому значенні ПО бурового розчину в основному визначається зондами БКЗ, так само як і вертикальна роздільна здатність комплексу БКЗ+БК чи БКЗ+БК+ІК.

На рис. 7.10 наведено результати для свердловини, що заповнена соленим буровим розчином з ПО, що дорівнює  $\rho_C = 0.34 \text{ Ом}\cdot\text{м}$  (порівн. див. рис. 7.5).

Аналізуючи наведені порівняння, можна було би в першому наближенні сказати, що розв'язок оберненої задачі 4ІК+БКЗ+БК+ІК є якимось "середнім" між 4ІК і БКЗ+БК+ІК.

Але при більш детальному аналізі можна пересвідчитися, що в тих місцях, де БКЗ+БК+ІК має низьку точність – загальний результат покращується завдяки 4ІК і навпаки. Тобто об'єднаний результат не помножує помилки.

Наприклад, порівнюючи інтервал 2680-2685 м, ми бачимо, що БКЗ+БК+ІК майже не відчув вертикальної неоднорідності, в той же час така неоднорідність відчутна за результатами 4ІК і, як наслідок, присутня на спільному результаті.

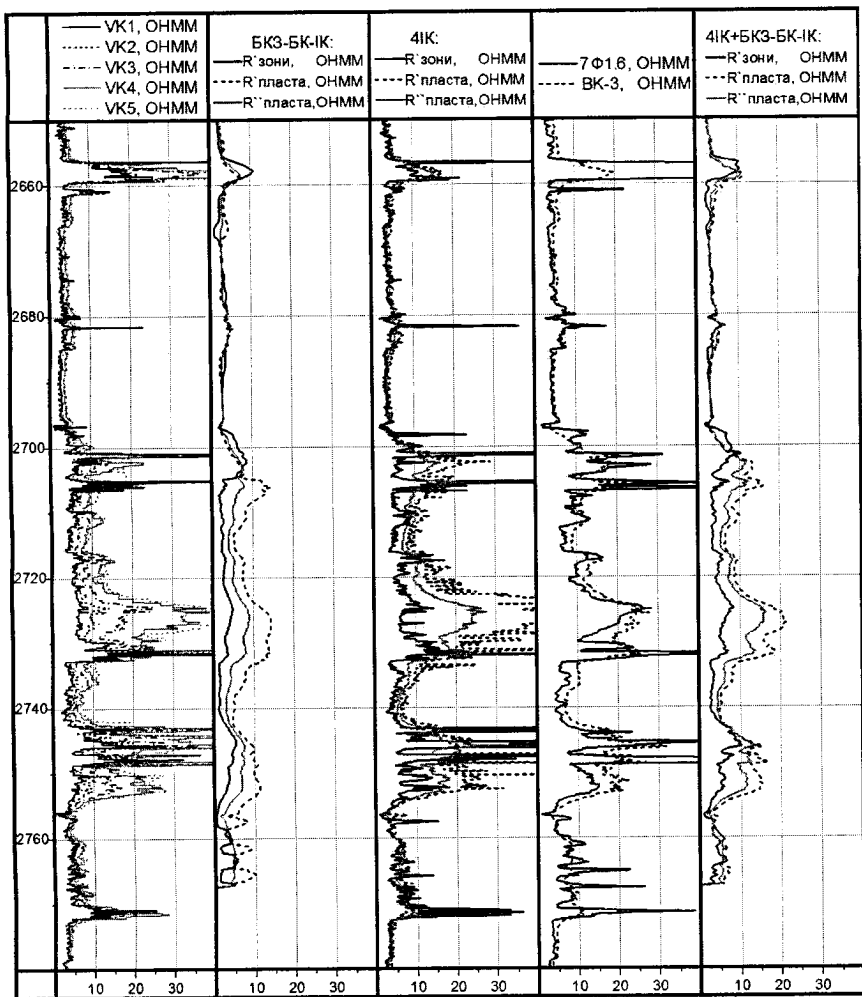
Отже, можна дійти висновків, що ми маємо розроблений і реалізований алгоритм розв'язання оберненої задачі, який було успішно реалізовано для комплексів БКЗ+БК, БКЗ+БК+ІК, 4ІК, 4ІК+БКЗ+БК+ІК.

Проте, як і перед завершенням створення алгоритмів розв'язання прямої задачі ЕК та ІК ми мали протестувати їх, тепер слід протестувати наведені алгоритми розв'язання оберненої задачі.

Може здаватись, що наведеного матеріалу достатньо, для того щоби стверджувати, що тестування проведене. Але, як не дивно, наведений тестовий і практичний матеріал вказує лише на проведення першої з двох необхідних частин тестування.

Тепер ми можемо розглянути наступну частину, а саме питання, яким, на жаль, мало приділяють уваги, але без розгляду яких процес перевірки та встановлення факту практичної застосовуваності алгоритмів розв'язання обернених задач електрометрії не можна вважати закінченим.

А саме ми розглянемо питання стійкості і однозначності розв'язку оберненої задачі.



**Рис. 7.10.** Св. Єганська. Порівняння розв'язання оберненої задачі для різних комплексів

# ПОХИБКА ТА ЕКВІВАЛЕНТНІ РОЗВ'ЯЗКИ ОБЕРНЕНОЇ ЗАДАЧІ

## 1. Чи можливий точний розв'язок оберненої задачі?

Математика як наука виникла у зв'язку з необхідністю вирішення практичних завдань: вимірювання на місцевості, навігації, торгівлі. Тому вона була в першу чергу числовою наукою. Її метою було отримання розв'язку у вигляді конкретного числа. Але майже будь-який числовий розв'язок передбачає похибку. Що ж тоді розуміти під точним числовим розв'язком?

Розглянемо питання визначення числового значення ірраціонального числа  $\pi$ . Цілком очевидно, що не можна його записати в явному вигляді повністю. Ми можемо записати тільки якусь його округлену частину. Але чи означає це, що задача обчислення його значення не має точного числового розв'язку і будь-який її розв'язок буде отримано з похибкою?

Якщо питання похибки виникає в такому простому прикладі, його не можна не розглядати в задачах, які мають практичну спрямованість. Особливо якщо врахувати, що ГДС є однією з найбільш числових областей науки у буквальному розумінні цього слова: замовника геофізичних послуг цікавлять числа, а саме цифра кількості можливого корисного флюїду і цифра можливої швидкості його видобутку у конкретній свердловині.

Природно, що всі дані, одержані неточно, але необхідні для розрахунку цих двох чисел, вносять свою похибку в загальний результат. Таким чином, для розуміння підсумкової похибки остаточного результату необхідно проаналізувати, на якому етапі вирішення задачі яка похибка виникає і як вона впливає на остаточний результат.

Також необхідно визначитися, що слід розуміти під точним числовим розв'язком.

Виникнення похибки розв'язання оберненої задачі може бути обумовлене, наприклад, наступними причинами:

1) її математичний опис є неточним, зокрема неадекватно або неточно описана сама модель чи її параметри тощо;

2) метод, що застосовується для її вирішення, не є точним;

3) при введенні даних в ЕОМ, при виконанні арифметичних операцій і при виведенні даних здійснюється округлення.

Похибки, що відповідають цим причинам, називають:

- 1) неусувною похибкою,
- 2) похибкою методу,
- 3) обчислювальною похибкою.

Чи означає наявність однієї або декількох таких похибок неможливість точного числового розв'язання?

Для початку наведемо в якості ілюстрації приклад ЕК. Розглянемо числове моделювання лабораторного експерименту визначення коефіцієнта зонда в електролітичній ванні. Рівняння, яке описує розподіл потенціалу (рівняння Лапласа):

$$\Delta U = 0. \quad (8.1.1)$$

Похибка моделі відразу закладена у самому рівнянні: ми припускаємо, що середовище є однорідним, що є наближенням (ідеально однорідних середовищ не існує).

Більш того, так як на практиці в зондах ЕК не використовується суворо постійний струм (частота генератора коливається, як правило, від десятків до сотень Гц), то розв'язок задачі вже набуває неусувної похибки на стадії вибору моделі постійного струму, бо при ненульовій частоті струму між поверхнею електрода і середовищем виникає електрохімічна різниця потенціалів, вплив якої можна спрощено представити у вигляді наявності ємності  $C_0$ , включеної послідовно з опором  $R_0$  (рис. 8.1).

Інше джерело похибки міститься в неможливості абсолютно точно задати числові значення геометричних параметрів моделі. Тобто навіть

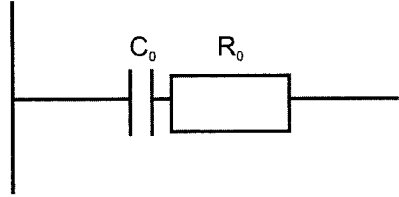


Рис. 8.1. Зміна характеру контактного опору на границі электрод-свердловина

врахувавши реальну частоту струму і реальну неоднорідність середовища, ми не можемо абсолютно точно описати геометрію експерименту.

Сама назва цієї похибки «неусувна» відповідає її суті: вона неконтрольована в процесі числового розв'язання задачі і може зменшитись тільки за рахунок більш точного опису фізичної задачі, математичного її опису чи більш точного визначення її параметрів, а не за рахунок вибору параметрів алгоритму моделювання.

Але рівняння (8.1.1), крім усього іншого, для заданих «точно» реальних умов не розв'язується в явному вигляді: для його вирішення потрібно застосування числового методу. І тут знов виникає похибка – обчислювальна. Наприклад, через необхідне обмеження кількості розрядів чисел, що беруть участь в обчисленнях (див. приклад з числом  $\pi$ ).

Отже, наша сумарна похибка буде сумою неусувної, похибки методу та обчислювальної.

Часто виникає ситуація, коли замовник геофізичних послуг пред'являє непомірні вимоги до точності результату. Це може бути викликано його перебільшеним уявленням про можливості обчислювальної техніки, неповним розумінням, що саме в кінцевому підсумку йому необхідно знати і з якою точністю, або загальним нерозумінням, що в області числового моделювання при вирішенні реальних прикладних задач не існує «абсолютно точного» розв'язання задачі.

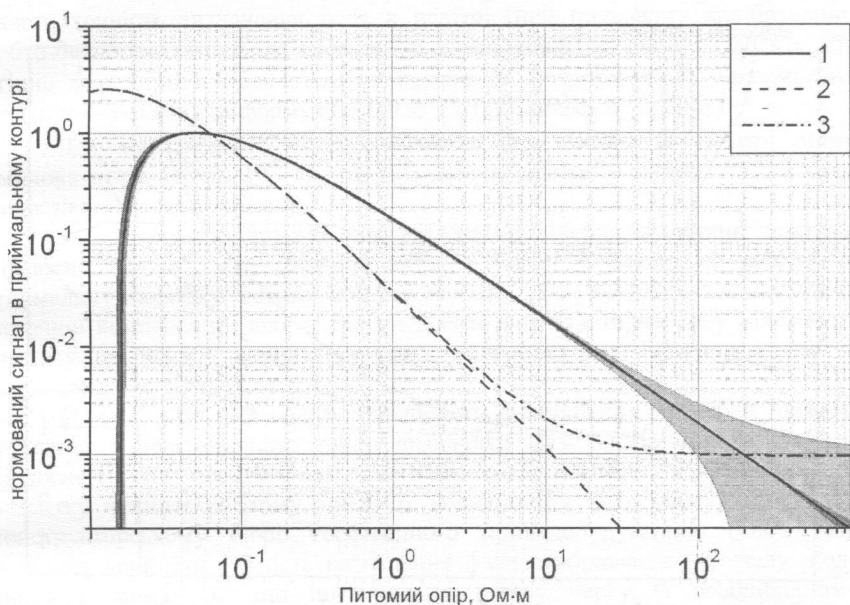
Такі вимоги часто знімаються у процесі:

- більш детального підходу до вивчення завдання в цілому (виявляється, що точність, яка вимагається, є занадто перебільшеною);
- математична модель явища надто груба і вимагати високу розрахункову точність безглуздо;
- параметри моделі не можуть бути визначені з більш високою точністю;
- замовнику взагалі потрібен не кількісний, а якісний результат.

Але припустимо, що наша модель адекватно описує процес. Тобто обрана фізична модель і її параметри вважаються частиною постановки задачі. Фактично ми відокремлюємо питання точності методу розв'язання і жодної іншої похибки, окрім похибки моделювання, у нас немає.

Чи можна формально говорити тоді про точне розв'язання задачі моделювання?

Під **точним** числовим розв'язанням оберненої задачі каротажу ми будемо розуміти **реалізовану можливість отримати числове значення розв'язку з як завгодно малою, проте наперед заданою величиною похибки для заданої фізичної і геометричної моделі простору, в якому цей процес відбувається.**



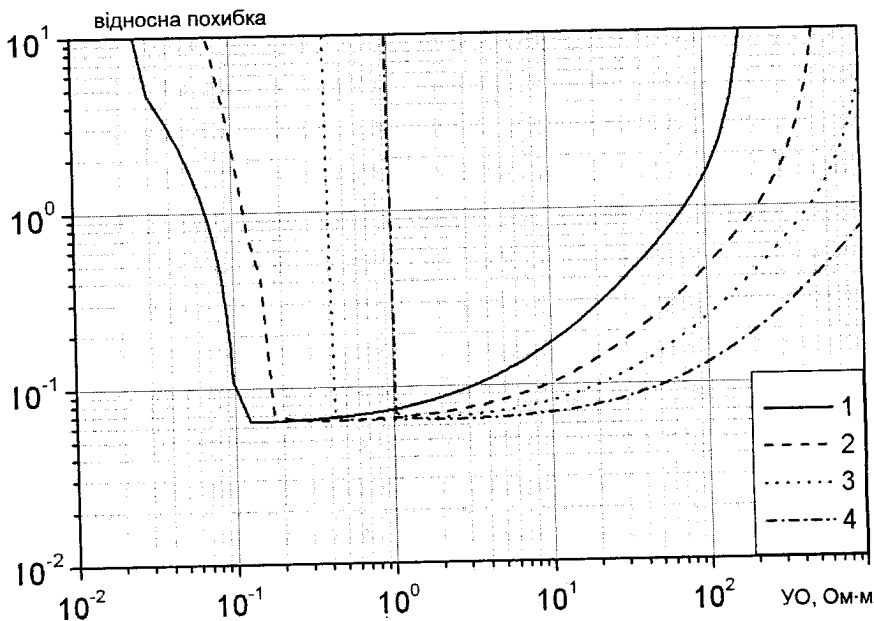
**Рис. 8.2.** Залежність нормованої складової сигналу у вимірювальному контурі зонда І0.85 від ПО однорідного нескінченного середовища:

1 – активної при відсутності похибки; 2 – реактивної при відсутності похибки; 3 – реактивної при неточній калібрівці;  – інтервал можливих значень активної складової при неточному визначенні фази вимірюваного сигналу відносно опори, але при точній калібрівці у повітрі;  – інтервал можливих значень активної складової при одночасній присутності постійної завади (неточна калібрівка: сигнал у повітрі дорівнює  $10^{-3}$ ) та неточності визначення фази сигналу, що вимірюється відносно сигналу опори

Використовуючи такий підхід, ми можемо стверджувати, що не тільки задача визначення значення числа  $\pi$  має розв'язок, але і пряма та обернена задачі ЕК чи ІК (в межах обраної моделі розрізу) можуть мати розв'язок.

З іншого боку, вирішення оберненої задачі ЕК або ІК в цілому складається як з процесу числового розв'язання (тим чи іншим методом), так і з вибору моделі самого каротажу тощо.





**Рис. 8.3.** Відносна похибка виміру УО зондами:  
 1 — 10.5; 2 — 10.85; 3 — 11.26; 4 — 12.05

На прикладі виникнення контактної різниці потенціалів в ЕК ми переконалися в можливому виникненні похибки, пов'язаної з точністю самої моделі.

Розглянемо подібний приклад в ІК.

Важливим аспектом теорії та методології ІК залишається питання точності виміру і впливу різних типів похибок на його результат, а також на реальний робочий діапазон апаратури.

У класичній літературі поняття діапазону вводиться на основі аналізу залежності нормованого сигналу від УО або УП в однорідному нескінченному середовищі (див. главу 3, п. 3.3). Так, прийнято вважати, що робочий діапазон ПО (див., наприклад, рис. 3.9, 3.10) розташований по одну сторону від екстремуму і обмежений деякими абсолютними значеннями нормованого сигналу, наприклад 0.95 і 0.05 (Плюснин, 1968) (без обмеження загальності ми обмежимося розглядом тільки активної компоненти). З огляду на деякий технічний прогрес для прикладу обмежимо діапазон виміру УО значенням  $10^{-3}$  у відносних одиницях. Можливі й інші підходи, наприклад:

задати точність визначення поля в повітрі (при польовому калібруванні, тобто безпосередньо перед роботою на свердловині) на рівні  $\pm 3$  мСм/м або згідно з технічним паспортом апаратури ІК розрахувати максимально допустиму похибку за формулою  $0,03\sigma \pm 1$  (Техническая..., 2002).

Для визначеності будемо вважати, що сигнал в повітрі може змінюватися в межах  $10^{-3}$  від максимального значення сигналу (що і зараз недосяжно висока точність).

Зазначимо, що згадані підходи до визначення величини похибки кількісно близькі, але обраний нами є більш жорстким і забезпечує мінімальну похибку всього комплексу 4ІК. Для розгляду впливу такої неточної компенсації поля в повітрі досить розглядати не саму залежність сигналу від опору, а його значення, що лежать в інтервалі  $\pm 10^{-3}$  в абсолютних величинах.

Однак існує ще одна можливість виникнення похибки виміру, пов'язана з неможливістю точно визначити фазу вимірюваного сигналу відносно сигналу передавального контуру (сигналу опори). Сучасний рівень розвитку техніки, в тому числі в колишньому київському «Дослідно-конструкторському бюро геофізичного приладобудування» (ОКБ ГП), дозволяв приймати точність визначення фази вимірюваного сигналу щодо опори в межах  $3^0$ , що пов'язано, в першу чергу, з особливостями відцифрування активної і реактивної компонент низькочастотного сигналу в різних контурах (у високочастотних методах вдається вимірювати різницю фаз з точністю  $0.5^0$  (Технологія ..., 2000).

Виявляється, що при одночасному врахуванні цих двох факторів, сумарна похибка буде значно перевищувати похибку, отриману в результаті простого підсумовування окремих похибок, викликаних окремо чи неточністю калібрування, чи то неточністю визначення фази вимірюваного сигналу щодо опори.

На рис. 8.2 представлена залежність активної та реактивної компонент сигналу без похибки, а також області його можливих значень при одночасній дії описаних похибок.

Аналіз показує, що в цьому випадку в області номінального діапазону похибка становить не більше 6%, а в області малих значень опорів (зліва від екстремуму графіка на рис. 8.2) призводить до відносної похибки, що набагато перевищує 100%, що виключає можливість використовувати «ліву» частину графіка при інтерпретації.

На рис. 8.3 представлені залежності відносної похибки вимірювання УО різними зондами ІК, що розраховані, виходячи з припущення, що сигнал в повітрі дорівнює  $10^{-3}$ , а точність визначення фази вимірюваного сигналу щодо опори становить  $3^0$ .

Очевидно, що розглянута похибка не тільки істотно обмежує реальний діапазон виміру, а й може істотно знижувати точність комплексу в цілому.

Відтак залишається відкритим питання: як похибка виміру вплине на похибку розв'язання оберненої задачі?

Або інакше: чи можемо ми стверджувати, що точно вирішили обернену задачу, якщо як її граничні умови, так і сама модель є наближеними і містять неусувну похибку?

Насправді ці питання приховують в собі і питання стійкості. Іншими словами: чи не виникне ситуація, коли незначна зміна граничних умов (даних виміру) призведе до значної зміни результатів розв'язання (значень геоелектричних параметрів)?

## 8.2. Розв'язання з урахуванням похибки

Найпростіший шлях, що взагалі можливо обрати для дослідження впливу похибки в граничних умовах оберненої задачі на її остаточний результат, це знайти область можливих розв'язків, що відповідають області можливих значень граничних умов.

Тобто метою дослідження буде не причина виникнення похибки, а те, як її величина впливає на величину похибки розв'язання оберненої задачі.

Перед цим нагадаємо два визначення.

Коректно поставленою (за Адамаром) задачею називається задача, яка задовольняє трьом наступним вимогам:

- задача має розв'язок (вимога існування);
- існуючий розв'язок є єдиним (вимога єдності);
- існуючий та єдиний розв'язок безперервно залежить від вхідних даних (умова неперервності).

Погано обумовленою задачею називається задача, для якої невелика помилка (похибка) в початкових (граничних) даних здатна призвести до значно більшої помилки у розв'язку.

Для зручності називатимемо погано обумовлену задачу нестійкою (тобто задача може задовольняти умові неперервності, але бути погано обумовленою, тобто нестійкою).

Дослідимо тепер відображення області допустимих значень кожного вектора виміру у простір векторів геоелектричної моделі розрізу, використовуючи значення похибок, що відповідають дійсно можливим. Так, одним із можливих способів завдання похибки є (Техническая..., 2002):

$$- \text{для БКЗ (не більше чим) у \%: } \varepsilon_{БКЗ} = \pm \left( 2,5 + 0,004 \left( \frac{5000}{\rho} - 1 \right) \right),$$

– для ІК (не більше чим) в мСм/м  $\epsilon_{IK} = 0,03\sigma \pm 1$ ,

– для БК (не більше чим)  $\pm 5\%$ .

Будемо вважати, що така похибка включає в себе всі можливі похибки.

Продемонструємо такий "найпростіший шлях" на прикладі каротажу комплексом 4ІК у двох свердловинах; похибку будемо задавати двома шляхами:

– вимір кожного зонда має похибку в межах заданої величини  $\epsilon$ , тобто вимірювана величина  $\bar{\rho}$  належить інтервалу:  
 $(1-\epsilon)\bar{\rho} < \rho < (1+\epsilon)\bar{\rho}$  (для зручності спочатку розглянемо однакову похибку для всіх зондів комплексу), тобто, взагалі кажучи,  $\epsilon$  не числом, а довірчим інтервалом;

– опір свердловини визначено з деякою похибкою  $\delta$ , тобто ПО свердловини  $\rho_C$  може набувати будь-якого значення з інтервалу:

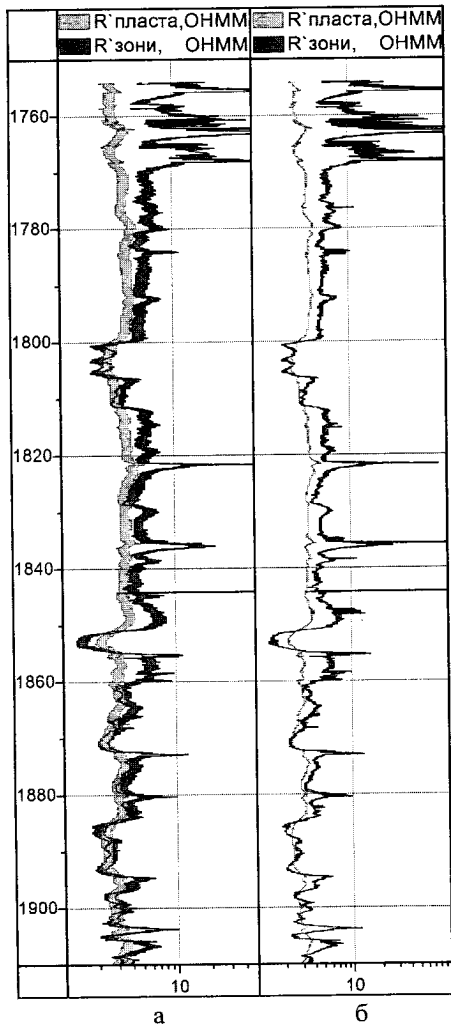
$$(1-\delta)\rho_C < \rho_C < (1+\delta)\rho_C.$$

Другий тип обрано для дослідження стійкості розв'язку від параметрів свердловини.

Розглянемо розв'язання оберненої задачі для вже згадуваних свердловин: Ватинської (рис. 8.4) та Єганської (рис. 8.5).

Значення похибки були задані наступні:

$\epsilon = 0.1$  (рис. 8.4.а, 8.5.а),  $\delta = 0.2$  (рис. 8.4.б, 8.5. б).



**Рис. 8.4.** Св. Ватинська (ПО бурового розчину 1.6 Ом·м). Результат розв'язання оберненої задачі (пояснення в тексті)

Нагадаємо: обернена задача щоразу розв'язувалась з рівними ваговими коефіцієнтами для всіх зондів комплексу (тобто в (7.1.1) було покладено  $\forall i: K_i = 1$ ).

Зазначимо, що на рис. 8.5.б наведено результати тільки для R`пласта, оскільки інтервали можливих значень R`зони мають відверто хаотичний характер і не несуть жодної інформації, нагадуючи генератор випадкових чисел.

Такий хаотичний характер якраз і є свідченням типового прикладу нестійкого розв'язку, коли для кожного конкретного значення даних виміру ми маємо конкретне значення розв'язку, але малій зміні даних виміру відповідає велика (на порядки більша) зміна значення розв'язку оберненої задачі. Це є також прикладом того, що розв'язок може задовольняти умові неперервності, але не бути стійким.

На основі отриманих результатів були зроблені наступні висновки.

Для свердловини, що заповнена глиняним буровим розчином (рис. 8.4):

- обернена задача комплексу 4ІК в межах значень шуканих параметрів є стійкою відносно похибки виміру: величина інтервалу можливих значень параметрів моделі майже пропорційна величині інтервалу можливих значень виміру (рис. 8.4.а);

- обернена задача для комплексу 4ІК в межах значень шуканих параметрів до 10 мСм/м є стійкою відносно зміни ПО бурового розчину: величина інтервалу можливих значень параметрів моделі майже пропорційна величині інтервалу можливих значень ПО бурового розчину (рис. 8.4.б);

- обернена задача для комплексу 4ІК в межах значень шуканих параметрів більше 10 мСм/м задовольняє умові неперервності, але не є стійкою відносно зміни ПО бурового розчину: величина інтервалу можливих значень параметрів моделі значно більша величині інтервалу можливих значень ПО бурового розчину (рис. 8.4.б);

- значення R`зони більш "чутливі" до зміни параметрів свердловини, ніж значення R`пласта.

Для свердловини, що заповнена соляним буровим розчином (рис. 8.5):

- обернена задача комплексу 4ІК в межах значень шуканих параметрів до 10 мСм/м є стійкою відносно похибки виміру: величина інтервалу можливих значень параметрів моделі майже пропорційна величині інтервалу можливих значень виміру (рис. 8.5.а);

- обернена задача комплексу 4ІК в межах значень шуканих параметрів більше 10 мСм/м задовольняє умові неперервності, але не є стійкою відносно похибки виміру: величина інтервалу можливих значень параметрів моделі значно більша величині інтервалу можливих значень виміру (рис. 8.5.а);

- обернена задача комплексу 4ІК не є стійкою відносно зміни ПО бурового розчину: величина інтервалу можливих значень одного з параметрів

моделі (а саме R'зони) значно більша величини інтервалу можливих значень ПО бурового розчину;

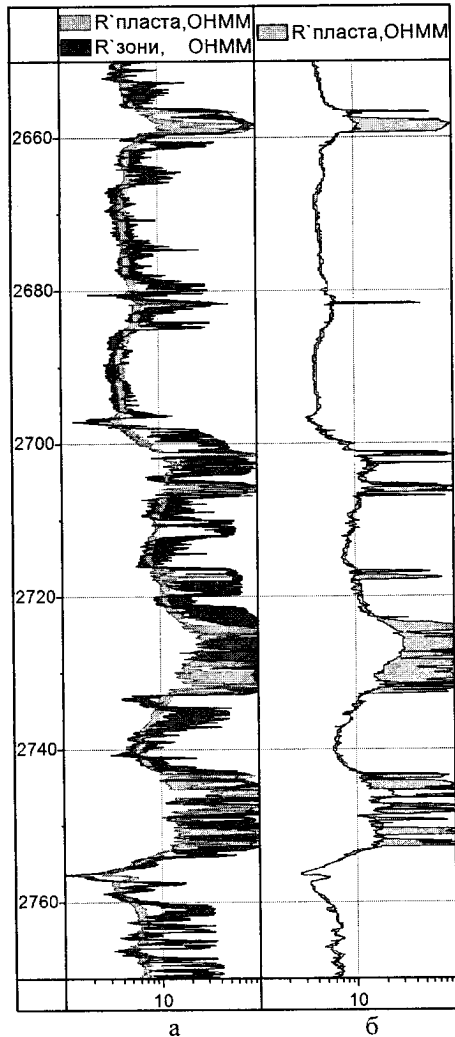
– параметр R'пласта має як стійку область визначення (до 10 мСм/м), так і нестійку область визначення (більше 10 мСм/м), як це видно на рис. 8.5.б.

Подібних прикладів можна навести багато для різних свердловин і різних комплексів, але головним є той факт, що в принципі існують області нестійких (хоча і неперервних) розв'язків.

Тобто, задавши конкретні значення УП, ми, звичайно, отримаємо конкретне значення розв'язку, але, можливо, воно буде нестійким, і незначній зміні значення УП буде відповідати значна зміна (на порядки більша) такого розв'язку.

Зрозуміло, що з точки зору ГДС такий розв'язок використовувати неможливо. Або ж при подальшій інтерпретації він призведе до помилкових висновків відносно визначення характеристик продуктивності свердловини.

Отже, ми дійшли висновку, що недостатньо мати сам по собі спосіб розв'язання оберненої задачі. Треба ще і мати спосіб, який дозволить для кожної моделі розрізу і кожного комплексу визначати області стійкості розв'язків оберненої задачі.



**Рис. 8.5.** Св. Єганська (ПО бурового розчину 0.34 Ом·м). Результат розв'язання оберненої задачі (пояснення в тексті)

### 8.3. Характеристики просторової роздільної здатності

Для того, щоби дослідити області стійкості розв'язання, ми розглянемо так звані характеристики просторової роздільної здатності.

Для цього розглянемо простір  $P$  параметрів  $\bar{p}$  досліджуваних об'єктів і простір  $G$  можливих значень  $\bar{g}$  вимірювання зондуючим комплексом каротажу. Для того щоби задача мала розв'язок, будемо вимагати, щоб кількість незалежних вимірювань була більшою або дорівнювала кількості шуканих параметрів моделі. Існує однозначне відображення:  $P \rightarrow G$  (будемо позначати відповідну функцію відображення  $G$ ). Розглянемо особливості оберненого відображення  $G \rightarrow P$  (будемо позначати відповідну функцію  $G^{-1}$ ), яке в разі відображення одного елемента будемо вважати однозначним. Якщо об'єкт відображення не один елемент  $\bar{g}$ , а область  $\bar{g} \pm \delta\bar{g}$ , де  $\delta\bar{g}$  приймає будь-які значення в межах допустимої похибки, то образом такого відображення також буде якась область (знак « $\pm$ » зазвичай використовують, якщо компоненти векторів можуть приймати тільки позитивні значення; ми його використовуємо тут, дотримуючись швидше традиції, що склалася в середовищі каротажників). Розглянемо таке відображення:  $\bar{p} \pm \delta\bar{p} = G^{-1}(\bar{g} \pm \delta\bar{g})$ . Зауважимо, що оскільки обернена задача є нелінійною – величина  $\delta\bar{p}$  залежить і від самої моделі, і від похибки вимірювання:  $\delta\bar{p} = \delta\bar{p}(\bar{p}, \delta\bar{g})$ . Похибка вимірювання також в загальному випадку залежить від моделі середовища:  $\delta\bar{g} = \delta\bar{g}(\bar{p})$  (зокрема, це пояснюється тим, що похибка будь-якого вимірювального пристрою неоднакова на всьому робочому діапазоні (див., наприклад, рис. 8.2, 8.3).

Така складна залежність не дозволяє ввести загальне просте поняття та визначення характеристики просторової роздільної здатності апаратури не тільки для всього діапазону параметрів всіх можливих актуальних моделей розрізів, але навіть для сукупності кількох окремих моделей і необхідно вимагає вивчення кількісної залежності  $\bar{p} \pm \delta\bar{p} = G^{-1}(\bar{g} \pm \delta\bar{g})$  окремо для кожної моделі (для різних  $\bar{g} \pm \delta\bar{g}$ ).

Відповідно, говорити про характеристики просторової роздільної здатності конкретної апаратури можна тільки для конкретної моделі розрізу: навіть при незначній зміні параметрів моделі характеристики можуть значно змінитися. Саме це ми і спостерігали у попередньому пункті.

Отже, аналіз таких характеристик потрібно проводити для якоїсь окремо обраної моделі.

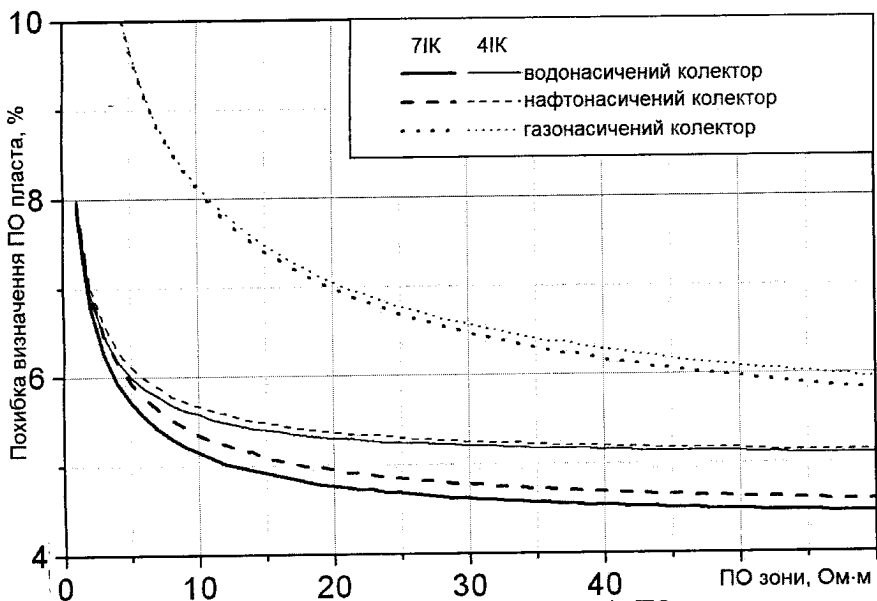


Рис. 8.6. Залежність похибки визначення ПО пласта від ПО зони

Для кожної такої обраної моделі будемо виконувати наступні дії:

1. Задавати її параметри – визначення вектора параметрів моделі  $\bar{p}$ .

2. Розв'язувати пряму задачу для  $\bar{p}$  – визначення вектора вимірювань

$$\bar{g} = G(\bar{p}).$$

3. Розв'язувати обернену задачу для визначеного  $\bar{g}$  – знаходження

елемента  $\bar{p}'$  такого, що:

$$\bar{p}' = G^{-1}(g) = G^{-1}(G(\bar{p})). \quad (8.3.1)$$

4. Порівнювати  $\bar{p}'$  і  $\bar{p}$  – визначення точності розв'язання оберненої задачі.

У разі, якщо  $\bar{p}'$  не відрізняється від  $\bar{p}$  (в межах допустимої, як завгодно малої, заздалегідь заданої похибки), ми будемо вважати, що:

$$\bar{p}' \equiv \bar{p}. \quad (8.3.2)$$



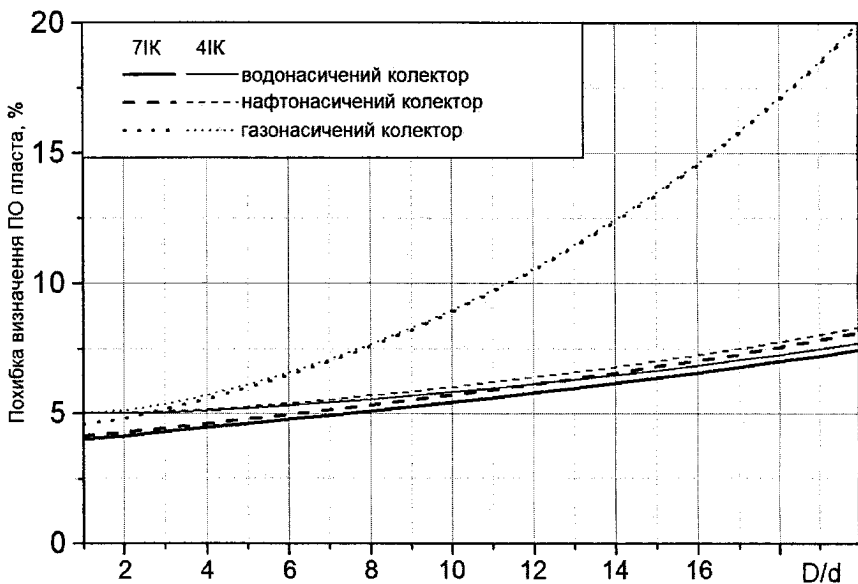


Рис. 8.7. Залежність похибки визначення ПО пласта від її діаметра

Виконання (8.3.2) буде означати, що отримана характеристика просторової роздільної здатності – вірна і не залежить від методу розв'язання оберненої задачі.

5. Розв'язання оберненої задачі для області  $g + \delta g$  – знаходження множини можливих моделей  $p + \delta p$ , що відповідають  $g + \delta g$  (визначення похибки  $\delta p$  в залежності від заданої величини похибки  $\delta g$ ).

Продемонструємо такий зв'язок похибки каротажу з похибкою можливого визначення шуканих параметрів на декількох прикладах пластів-колекторів (див. глава 4) нескінченної потужності.

В якості апаратури ми будемо розглядати апаратуру 41К та теоретично розроблену апаратуру 71К, яка утворена з 41К шляхом додавання трьох малих зондів (0.35, 0.25, 0.15 м).

Похибку будемо задавати окремо для кожного зонда.

Для якісного пояснення очікуваних результатів досить скористатися наближеною теорією Доля і записати УП, вимірювану кожним зондом, наступуючи сигналом від свердловини у вигляді:

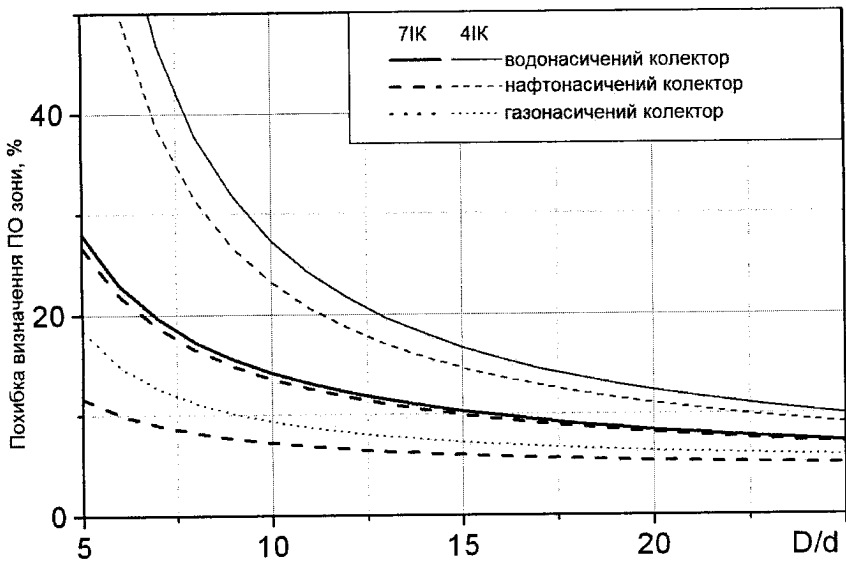


Рис. 8.8. Залежність похибки визначення ПО зони від діаметра зони

$$\sigma^i = \frac{g_3^i}{\rho_3} + \frac{g_{II}^i}{\rho_{II}}, \quad (8.3.5)$$

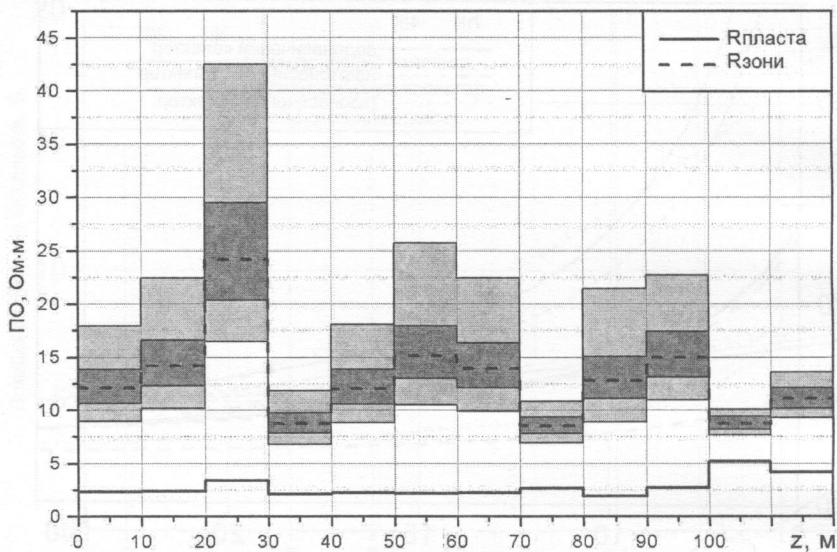
де  $\sigma^i$  – уявна провідність  $i$ -го зонда;  $g_3^i$ ,  $g_{II}^i$  – геометричні фактори зони проникнення і пласта.

Очевидно, що відносна точність визначення ПО пласта і зони проникнення пов'язана із взаємним відношенням першого і другого доданків в (8.3.5). Так, при:

$$\frac{g_3^i}{\rho_3} \ll \frac{g_{II}^i}{\rho_{II}}, \quad (8.3.6)$$

параметри ближньої зони визначаються з набагато більшою похибкою при  $\rho_{II} = const$ , ніж параметри далекої зони при  $\rho_3 = const$ .

Крім того, умова (8.3.6) виконується особливо суворо при підвищуючому проникненні, коли, крім  $g_3 < g_{II}$ , умова (8.3.6) посилюється ще і  $\rho_3 > \rho_{II}$ . Похибка визначення параметрів ближньої зони поліпшується



**Рис. 8.9.** Визначення ПО за комплексами 4ІК та 7ІК для заданих ПО пласта та ПО зони:

- довірчий інтервал визначення ПО зони по 4ІК,
- довірчий інтервал визначення ПО зони по 7ІК

при знижуючому проникненні, тому що умова  $\rho_z < \rho_{II}$  значно послаблює умову (8.3.6).

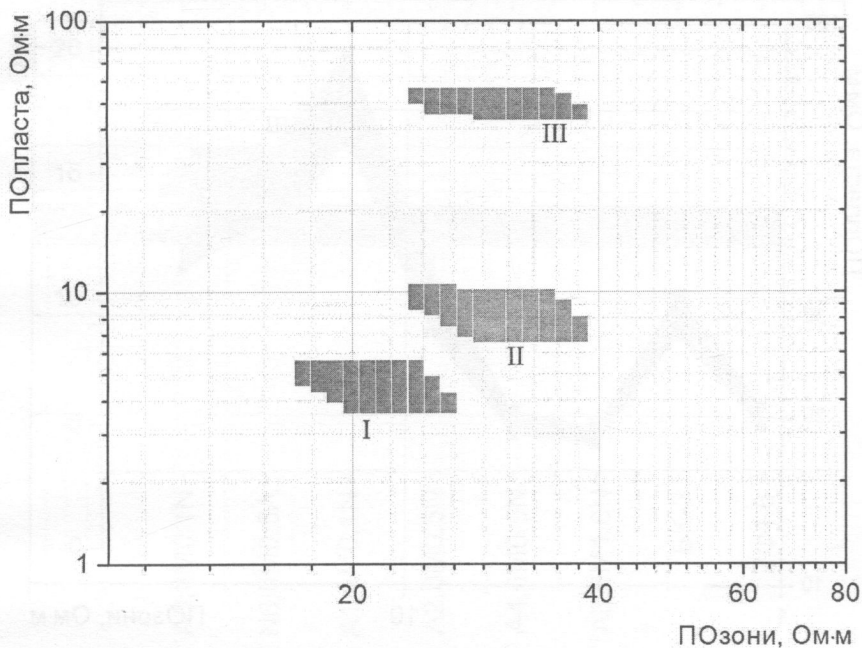
Власно кажучи, ці висновки підтверджують все викладене в гл. 6, 7 та у попередньому п. 8.2.

Але, окрім іншого, вони підтверджуються і прямим числовим моделюванням саме характеристик просторової роздільної здатності.

Так, на рис. 8.6 наведена залежність точності визначення ПО пласта від ПО зони проникнення, на рис. 8.7 – залежність точності визначення ПО пласта від діаметра зони проникнення, на рис. 8.8 – залежність точності визначення ПО зони від діаметра зони проникнення.

Також була розрахована похибка визначення ПО зони проникнення для різних пластів, значення параметрів яких були взяті за результатами інтерпретації даних ВІКІЗ в конкретній свердловині теригенного розрізу Західного Сибіру (рис. 8.8).

Отже, спосіб розрахунку характеристик просторової роздільної здатності дозволяє: по-перше, визначити, наскільки досліджувана апаратура



**Рис. 8.10.** Области еквівалентних моделей: I – водонасиченого колектора ( $\forall i: \varepsilon_i = 0.2$ ), II – нафтонасиченого колектора ( $\forall i: \varepsilon_i = 0.2$ ), III – газонасиченого колектора ( $\forall i: \varepsilon_i = 0.1$ )

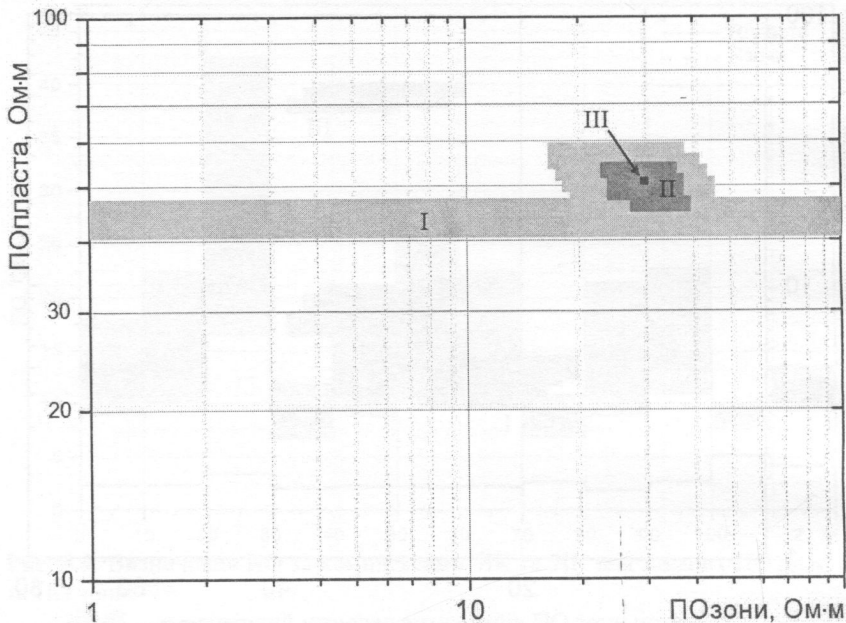
чутлива до тих чи інших шуканих параметрів моделі; по-друге, порівняти такі характеристики різних типів апаратури і тим самим обрати об'єктивно більш ефективну для кожної конкретної моделі розрізу.

Зазначимо, що для дослідження характеристик просторової роздільної здатності існують й інші підходи (Эпов та ін., 2001).

#### 8.4. Дослідження областей еквівалентності

Можливий і інший, більш швидкий і зручний, спосіб (дещо наближеного) аналізу характеристик просторової роздільної здатності.

Дійсно, що фактично ми досліджували у попередньому пункті?



**Рис. 8.11.** Ефект "сліпої зони" при дослідженні газонасиченого колектора.  
 I –  $\forall i: \varepsilon_i = 0.2$ , II –  $\forall i: \varepsilon_i = 0.1$ ; III –  $\forall i: \varepsilon_i = 0.05$

Простіше кажучи, ми досліджували, якій області можливих значень даних виміру відповідає яка область можливих значень параметрів моделі.

Тобто фактично ми вибирали всі розв'язки оберненої задачі, що відповідали множині:

$$\rho_i^T (1 - \varepsilon_i) < \rho_i^T < \rho_i^T (1 + \varepsilon_i), \quad (8.4.1)$$

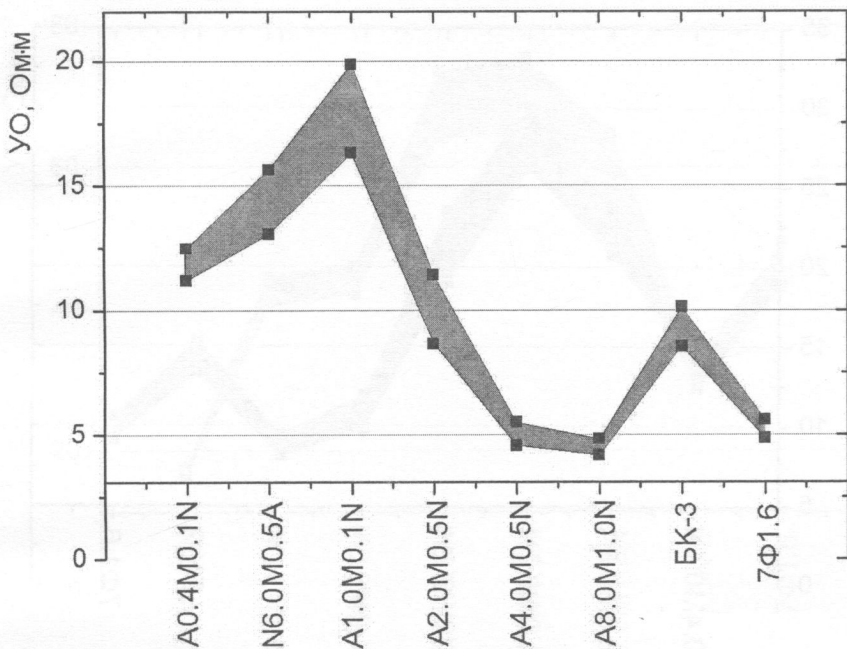
де  $\rho_i^T$  – теоретичні значення виміру,  $\varepsilon_i$  – величина, що визначає величину відносної похибки.

Реалізуємо такий вибір наступним простим чином.

Крок 1. Обираємо електрометричний комплекс, наприклад, БКЗ+БК+ІК.

Крок 2. Обираємо моделі пластів (див. глава 4, п.4.2), наприклад:

і. водонасичений колектор:  $\rho_{II} = 4,5 \text{ Ом}\cdot\text{м}$ ,  $\rho_3 = 20 \text{ Ом}\cdot\text{м}$ ,  $D/d = 5$ ,



**Рис. 8.12.** Области можливого зондування у водонасиченому колекторі з підвищуючим проникненням

ii. нафтонасичений колектор:  $\rho_{II} = 8,5 \text{ Ом}\cdot\text{м}$ ,  $\rho_3 = 30 \text{ Ом}\cdot\text{м}$ ,  $D/d = 4$ ,

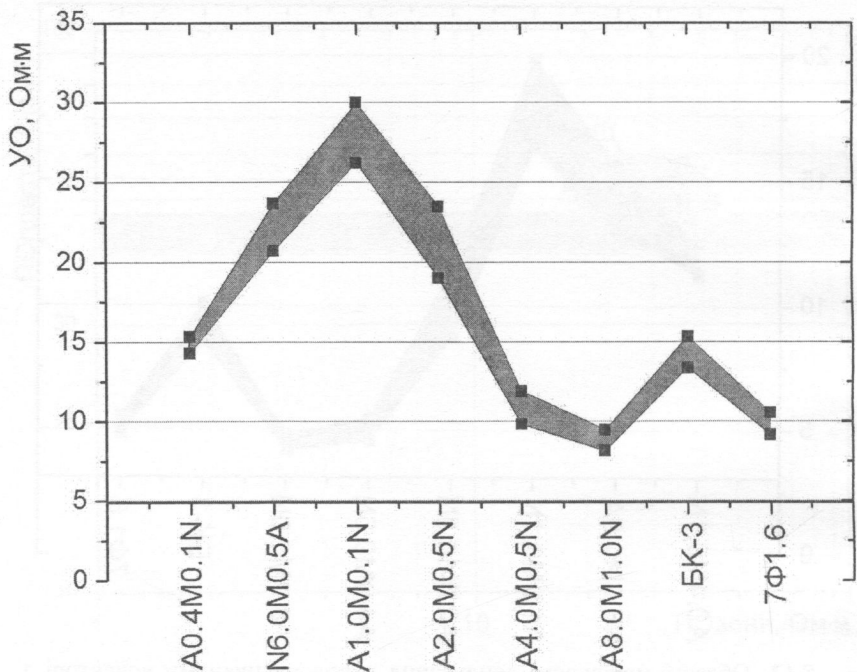
iii. газонасичений колектор:  $\rho_{II} = 50 \text{ Ом}\cdot\text{м}$ ,  $\rho_3 = 30 \text{ Ом}\cdot\text{м}$ ,  $D/d = 5$ .

Крок 3. Для обраних моделей і комплексу розв'язуємо пряму задачу.

Крок 4. Задавши для кожного зонда величину  $\varepsilon_i$ , що визначає величину відносної похибки, будемо області (8.4.1) за допомогою таблиці, що пов'яже дані параметрів моделі з теоретичними значеннями YO (див. глава 7, п.7.1). Очевидно, що така побудова (на відміну від п. 8.3) має похибку (яка буде тим меншою, чим більш щільно побудована наша таблиця), але вона є простішою у реалізації і вимагає менше часу обчислення.

Крок 5. Виводимо результат.

Виконавши всі ці кроки для обраного комплексу і обраних моделей, ми отримали представлений на рис. 8.10 результат, який саме і вказує, які значення параметрів шуканої моделі можуть відповідати нашому реальному, з урахуванням похибки, виміру.



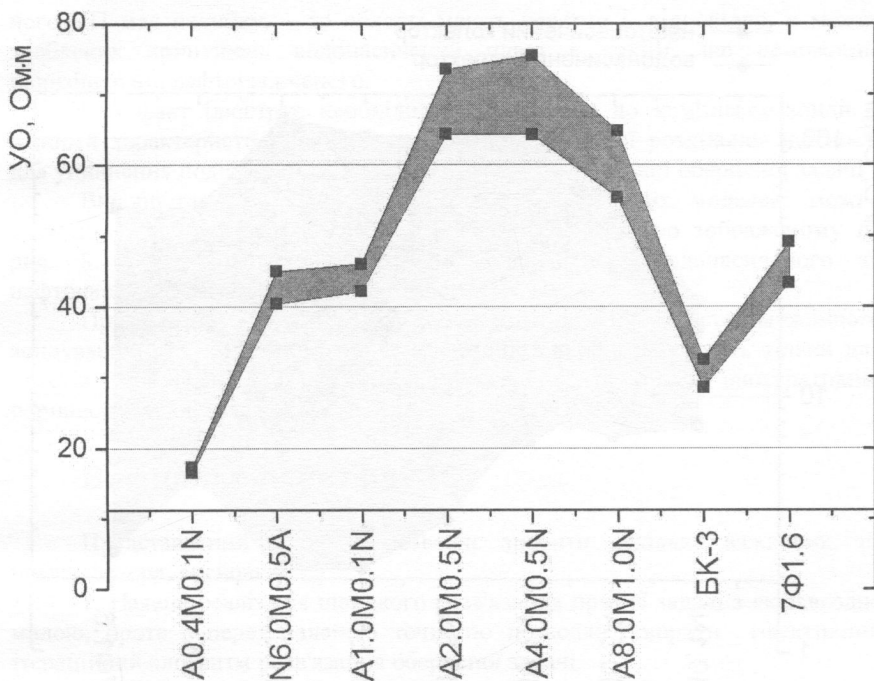
**Рис. 8.13.** Области можливого зондування у нафтонасиченому колекторі з підвищуючим проникненням

Може виникнути питання: чому ми обрали величину, що визначає величину відносної похибки для випадку газонасного колектору меншою, ніж для інших?

Відповідь виявиться дуже простою, якщо побудувати області еквівалентних моделей для газонасиченого пласта з різними значеннями  $\epsilon_i$  (див. рис. 8.11).

Для обраного комплексу і обраної моделі пласта при виборі  $\forall i: \epsilon_i = 0.2$  ми маємо ефект "сліпої зони", тобто випадок, коли при заданій величині похибки комплекс принципово не може визначити один з параметрів моделі.

Для цього випадку це пояснюється дуже просто: малі зонди комплексу БКЗ не працюють в цьому діапазоні величин опорів (див. глава 2, рис. 2.5), а великі мають занадто велику глибину дослідження, щоби відчутти зміну



**Рис. 8.14.** Области можливого зондування у газонасиченому колекторі із знижуючим проникненням

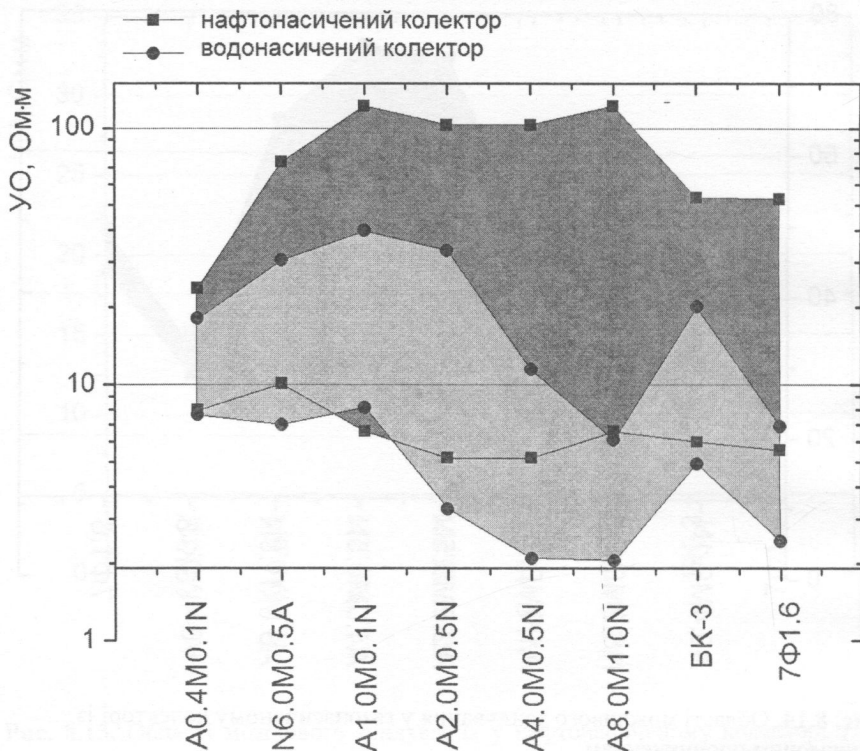
величини ПО такої малої зони при такій великій похибці. Тобто зміна їх УО, що буде відповідати зміні ПО зони, буде меншою, ніж задана похибка.

Окрім описаної побудови областей еквівалентності, можна досліджувати характеристики комплексу при наявності похибки і в інший спосіб, який заснований на використанні кривих зондування (див. гл. 5, п. 5.2).

Для заданого інтервалу допустимої зміни параметрів моделі ми будемо можливі криві зондування. Отримані криві будуть представляти собою деяку область. При цьому ми стверджуємо, що будь-яка крива зондування, що повністю належить цій області – відповідає заданій моделі (в межах заданої зміни її параметрів).

На рис. 8.12 побудовано області можливого зондування для водонасиченого колектора, на рис. 8.13 – для нафтонасиченого колектора, на





**Рис. 8.15.** Области можливого зондування у водонасиченому і нафтонасиченому колекторах з підвищуючим проникненням для всіх можливих значень ПО пласта та ПО зони

рис. 8.14 – для газонасиченого колектора (вважалось, що ПО пласта і зони можуть змінюватись в межах  $\pm 10\%$ ).

Такий підхід дозволяє визначити, в яких межах зміни параметрів моделі одній і тій самій кривій зондування можуть відповідати різні моделі пласта.

Так, на рис. 8.15 представлено області можливого зондування для водонасиченого та нафтонасиченого колекторів для всіх можливих значень їх ПО пласта та ПО зони (див. п.5.2),  $D/d$  було фіксовано.

Ми бачимо, що тільки завдяки зонду А8.0М1.0N області не мають перетину. І навпаки, якщо вилучити цей зонд із комплексу чи допустити, що

його УП має похибку, – то області мають перетин і, відповідно, в межах зроблених припущень водонасичений пласт є таким, що неможливо відрізнити від нафтонасиченого.

Цей факт ілюструє необхідність включення до комплексу зондів з різними характеристиками вертикальної та радіальної роздільної здатності для уникнення подібних неоднозначностей при розв'язанні оберненої задачі.

Використовуючи поняття областей еквівалентних моделей, можна сказати, що результати, представлені у вигляді (подібно зображеному на рис. 8.10) областей еквівалентних моделей для водонасиченого та нафтонасиченого пластів, мали би перетин на діаграмі.

При всій простоті описаний спосіб дослідження областей можливого зондування має недолік: він може ефективно використовуватись тільки для пластів нескінченної потужності, а отже, носить більш ілюстративно-порівняльний характер.

## Висновки до розділу II

Представлений матеріал дозволяє зробити декілька важливих, на погляд автора, висновків:

1. Наявна реалізація швидкого розв'язання прямої задачі з як завгодно малою, проте наперед заданою точністю дозволяє створити ефективний ітераційний алгоритм розв'язання оберненої задачі.

2. При розв'язанні оберненої задачі доцільно мати можливість змінювати вагові коефіцієнти кожного зонда комплексу у функціоналі, що обрано в якості міри "близькості", що дає змогу оптимізувати роздільну здатність методу в залежності від особливостей будови розрізу, розкритого свердловиною.

3. Перед практичним застосуванням будь-якого способу розв'язання оберненої задачі доцільно дослідити області стійкості її розв'язків, що дозволить їх використовувати в подальшому без втрати корисної інформації.

4. Для можливості ефективної подальшої роботи з отриманими результатами доцільно також дослідити області еквівалентних моделей, що відповідають реальній похибці каротажу та його геофізичним умовам.

## ВИСНОВКИ

---

---

Отже можна констатувати, що в даній роботі послідовно описано ефективні способи як моделювання електричного та індукційного каротажу (розв'язання їх прямих задач), так і розв'язання їх обернених задач.

Також підводячи підсумки, слід наголосити на двох головних тезах, які було покладено в підґрунтя всієї цієї роботи:

– основним результатом електричного чи індукційного каротажу є не виміряні уявні величини опору чи провідності (чи точність їх виміру), а можливість точного встановлення за цими уявними величинами геоелектричної моделі (значень її параметрів) розрізу, розкритого свердловиною;

– недостатньо отримати сам по собі результат розв'язання оберненої задачі: необхідно бути впевненим, що цей результат є достовірним; необхідно знати похибку, з якою він отриманий; необхідно переконатись, що він отриманий в області стійкості; необхідно розуміти, який геофізичний зміст містить отриманий розв'язок математичної задачі.

Якщо наведені в монографії результати розкрили зміст цих тез, то поставлена її автором мета була досягнута.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРИ

---

*Аксельрод С.М.* Интерпретация результатов индукционного каротажа. Региональная и промысловая геофизика. – М.: Недра, 1981. – 52 с.

*Аксельрод С.М., Бельский В.Г., Гаузер Г.Е.* Интерпретация результатов индукционного каротажа с использованием геометрического фактора, учитывающего скин-эффект // Тр. ВНИИГеофизики. Азерб. отд-ние. – 1978. – №5. – С. 22 – 27.

*Аксельрод С.М., Зунделевич С.М., Сохранов Н.Н. и др.* Автоматизированная система обработки и интерпретации данных геофизических исследований скважин (АСОИГИС ЕС): (Обзор). – М.: ВИЭМС, 1981. – 60 с.

*Аксельрод С.М., Путькардзе Л.А.* Комплексная интерпретация результатов каротажа с учетом изменчивости физических свойств и исследуемых объектов и ошибок измерения: (Обзор). – М.: ВИЭМС, 1979.

*Альбом* теоретических кривых электрического каротажа скважин. – М.: Недра, 1964. – 158 с.

*Альпин Л.М.* Дивергентный каротаж // Прикладная геофизика. – 1962а. – Вып. 32. – С. 192–212.

*Альпин Л.М.* К теории электрического каротажа буровых скважин. – М.: ОНТИ, 1938. – 136 с.

*Альпин Л.М.* Палетки бокового каротажного зондирования (БКЗ). – М.: Гостоптехиздат, 1958.

*Альпин Л.М.* Применение сеточного моделирования для решения задач теории электрического каротажа // Прикл. геофизика. – 1962б. – Вып. 34. – С. 198–217.

*Альпин Л.М.* Сеточное моделирование каротажа сопротивлений // Прикл. геофизика. – 1953. – Вып. 10.

*Альпин Л.М., Комаров С.Г.* Палетки БКЗ. Рабочий комплект. – М.: Гостоптехиздат, 1953.

*Альпин Л.М., Шейнманн С.М.* Некоторые расчеты по спонтанной поляризации // Бюл. нефт. геофизики. – 1936. – Вып. 3.

*Бакушинский А.Б., Гончарский А.В.* Некорректные задачи. Численные методы и приложения. – М.: Изд-во Моск. гос. ун-та, 1989. – 199 с.

*Балдин М.Ю., Шурина Э.П.* Методы решения СЛАУ большой размерности. Новосибирск: Изд-во Новосиб. гос. тех. ун-та, 2000. – 70 с.

*Басин Я.Н., Берман Л.Б., Нейман В.С.* О возможности выделения кавернозных и трещиноватых известняков методами промысловой геофизики // Прикл. геофизика. – 1964. – Вып. 39. С. 153 – 166.

*Бахова Н.И., Кашик А.С., Колосов А.Л., Челокьян Р.С.* Методы конечных разностей и конечных элементов в геофизике. – Киев: Институт геофизики им. Субботина НАН Украины, 1999. – 316 с.

*Беленький В.Г., Гаузер Г.Е. и др.* Программы выделения пластов и отбивки их границ по комплексу кривых КС // Библиотека программ для обработки геофизических данных на ЭВМ. – М.: ВНИИ Геофизика. – 1970.

*Бондаренко М.Т., Сохранов Н.Н., Евтеева О.Г.* Приведенные кривые каротажного зондирования // Развед. геофизика. – 1966. – Вып. 14. – С. 93 – 97.

*Бурсиан В.Р.* К вопросу о распределении потенциала вдоль оси скважины при наличии диффузионных (контактных) э.д.с. // Бюл. нефт. геофизики. – 1936. – Вып. 3.

*Буриштынович Я.Г., Ряскина И.В., Слукин А.В., Финкельштейн С.Н.* Опыт определения подсчетных параметров с помощью АСОИГИС/ОС (на примере Астраханского и Карачаганакского месторождений). // Обмен передовым опытом по обработке материалов ГИС на ЭВМ при исследовании нефтяных скважин с целью повышения их эффективности: Краткие тезисы докладов школы передового опыта (г. Калинин, 30 окт. 1986 г.). – Калинин: Союзпромгеофизика, 1986. – С. 11 – 13.

*Ваксман К.Г., Афонина Н.М., Плюснин М.И.* Решение обратной задачи индукционного каротажа для пачки пластов // Изв. ВУЗов. Геология и разведка. – 1988. – №9. С. 114–117.

*Вендельштейн Б.Ю.* О связи между параметром пористости, коэффициентом поверхностной проводимости, диффузионно-адсорбционной активностью и адсорбционными свойствами терригенных пород // Тр. Моск. ин-та нефтехим. и газ. пром-сти. – М.: Гостоптехиздат, 1960. – Вып. 31.

*Ворсингтон А., Мелдо Р.* Палетки для интерпретации диаграмм собственной поляризации: Пер. с англ. // Промысл. геофизика. – М.: Гостоптехиздат, 1959. – Вып. 1.

*Глинских В.Н., Никитенко М.Н., Лабутин И.Б., Горбатенко В.А.* Математическое моделирование и инверсия диаграмм электромагнитного каротажа с использованием графических процессоров // Геофизические исследования в скважинах. Материалы конф., г. Новосибирск, 8-10 ноября 2011 г. – Новосибирск: НПП "Луч", 2011.

*Глинских В.Н., Энов М.И.* Двумерная реконструкция геоэлектрического изображения по данным высокочастотного электромагнитного каротажа // Каротажник. – 2006. – №6. (147). – С. 59–68.

*Гомилко А.М., Савицкий О.А., Трофимчук А.Н.* Методы суперпозиции, собственных функций и ортогональных многочленов в граничных задачах теории упругости и акустики. – К.: Наукова думка, 2016. – 436 с.

*Губерман Ш.А.* Комплексная интерпретация геофизических данных с помощью обучающейся программы // Проблемы ядерной геофизики. – М.: Недра, 1964. – С. 64 – 73.

*Губерман Ш.А., Извекова М.П., Холин А.И., Хургин Н.И.* Использование алгоритма распознавания образов для решения задач промысловой геофизики // Докл. АН СССР. – 1964. – 154, №5.

*Данилов М.А.* Оперативная обработка промыслово-геофизических данных на ЭВМ: (Обзор). – М.: ОНТИ ВИЭМС, 1970. – 34 с.

*Данилов М.А., Кулинкович А.Е., Травникова И.А.* Применение машинных методов в практике интерпретации промыслово-геофизических данных // Автоматическая обработка и преобразование геофизической информации. – М.: Недра, 1968. – Вып. 3. – С. 137 – 147.

*Дахнов В.Н.* Интерпретация результатов геофизических исследований разрезов скважин. – М.: Гостоптехиздат, 1955. – 492 с.

*Дахнов В.Н.* Интерпретация результатов геофизических исследований скважин. – М.: Недра, 1972. – 368 с.

*Дахнов В.Н.* Каротажа скважин. Интерпретации каротажных диаграмм. – М.: ОНТИ, 1941. – 36 с.

*Дахнов В.Н.* Электрические и магнитные методы исследования скважин. – М.: Недра, 1967. – 368 с.

*Дахнов В.Н., Нейман Е.А.* Палетки ПКМ–МНИ для определения удельного электрического сопротивления пластов конечной мощности высокого сопротивления. – М.: Гостоптехиздат, 1953.

*Дмитриев В.И., Захаров Е.В., Ильин И.В.* О методе численного решения задачи индукционного каротажа в неоднородных средах // Изв. АН СССР. Сер. Физика Земли. – 1972. – №2. – С. 50–58.

*Довгий С.О., Євдоцук М.І., Коржнев М.М., Куліш Є.О., Курило М.М., Малахов І.М., Трофимчук О.М., Яковлев Є.О.* Енергетично-ресурсна складова розвитку України. – К.: Ніка-Центр, 2010. – 264 с.

*Довгий С.О., Бідюк П.І., Трофимчук О.М., Савенков О.І.* Методи прогнозування в системах підтримки прийняття рішень. – К.: Азимут-Україна, 2011. – 608 с.

*Доль Г.Г.* Теория индукционного метода исследования разрезов скважин и его применение в скважинах, пробуренных с глинистым раствором на нефти // Вопросы промышленной геофизики. – М.: Гостоптехиздат. 1957. – С. 252–274.

*Ельцов И.Н.* Быстрый алгоритм преобразования сигналов индукционного каротажа в кажущиеся сопротивления // Геофизические исследования в скважинах. Материалы конф., г. Новосибирск, 8-10 ноября 2011 г. – Новосибирск: НПП "Луч" 2011.

*Ельцов И.Н., Эпов М.И., Ульянов В.П., Никитенко М.П., Соболев А.Ю., Нестеров А.М.* Анализ и инверсия каротажных диаграмм в системе МДС ВИКИЗ–98 // Каротажник. – 2000. – 73. С. 70 – 84.

*Єзурнова М.Г., Зайковський М.Я., Заворотько Я.М., Цьоха О.Г., Кнішман О.Ш., Муляр П.М., Дем'яненко І.І.* Нафтогазоперспективні об'єкти України. Нафтогазоносність та особливості літогеофізичної будови відкладів нижнього карбону і девону Дніпровсько-Донецької западини. – Київ: Наукова думка, 2005. – 196 с.

*Журавлев В.П., Попов В.К.* Об учете экранных влияний на кривые КС двух тонких пластов // Прикл. геофизика. – 1962. – Вып. 134.

*Заборовский А.И.* Электроразведка. – М.: Гостоптехиздат, 1943.

*Зайченко В.Ю.* Страницы отечественного приборостроения в области геофизических исследований скважин (1917–1991 гг.). – Тверь.: АИС, 2006. – 248 с.

*Захаров Е.В.* Математическое моделирование в электромагнитном каротаже. – М.: Недра, 1979. – 96 с.

*Зверев Г.Н.* Задача анализа и теории индукционного каротажа // Изв. ВУЗов. Сер. Геология и разведка. – 1971. – № 11.

*Зверев Г.Н., Гамбургер В.В.* К проблеме анализа и синтеза информационных геофизических систем // Изв. ВУЗов. Сер. Геология и разведка. – 1971. – № 11.

*Зверев Г.Н., Заляев Н.З., Батанин В.А.* Непрерывная интерпретация данных каротажа в карбонатном разрезе с применением ЭВМ // Геофизические методы поисков и разведки нефти и газа в Припятской впадине. – Минск: Наука и техника, 1970.

*Зверев Г.Н., Санто К.Л., Зверева Э.П.* Методика моделирования аппаратуры и зондов индукционного каротажа на вычислительных машинах: (Обзор. Сер. Региональная, разведочная и промысловая геофизика). – М.: ВИЭМС, 1973. – 53 с.

*Зверев Г.Н., Труфанова Л.Д.* Организация вычислительного процесса и информации при обработке геофизических данных в комплексе ГИК-2: (Обзор). – М.: ВИЭМС, 1974. – 44 с.

*Зверев Г.Н., Чаадаев Е.В.* Вертикальный геометрический фактор зондов электрического каротажа // Геофизические исследования в нефтяных скважинах, испытания пластов и отбор керна. – Уфа: Моск. нефт.ин-т, Ин-т геологии и разработки горюч. ископаемых АН СССР, 1972. – Вып. 2. – С. 13–29.

*Зверев Г.Н., Чаадаев Е.В.* Электрическое поле точечного источника в наклонных слоях // Изв. ВУЗов. Сер. Геология и разведка. – 1971. – № 6. – С. 97–106.

*Зверев Г.Н., Шакиров Р.Х.* Оптимальная линейная фильтрация каротажных диаграмм // Геофизические методы исследований в нефтяных скважинах, испытания и отбор керна. – М.: Ин-т геологии и разработки горючих ископаемых, 1972.

*Золотова О.Е., Янин С.П.* Комплекс обслуживающих программ АСОИГИС БЭСМ-6. // Обмен передовым опытом по обработке материалов ГИС на ЭВМ при исследовании нефтяных скважин с целью повышения их эффективности. Краткие тез. докл. школы передового опыта (г. Калинин, 30 окт. 1986 г.). – Калинин: Союзпромгеофизика, 1986. – С. 26.

*Зунделевич С.М.* О результатах опробования универсального способа определения сопротивления пластов // Прикл. геофизика. – 1966. – Вып. 48. – С. 236–246.

*Зунделевич С.М., Комаров С.Г., Сохранов Н.Н.* Универсальный способ определения сопротивления пластов // Прикл. геофизика. – 1965. – Вып. 46. – С. 205–212.

*Зунделевич С.М., Сохранов Н.Н.* Выделение коллекторов в разрезе скважин и определение их удельного сопротивления по геофизическим данным при помощи УЦВМ // Применение новых математических методов и вычислительных машин в теории и практике добычи нефти



(материалы I Всесоюз. семинара): Тр. ВНИИГеофизики. М., 1966. – Вып. 47. – С. 278 – 284.

*Зунделевич С.М., Сохранов Н.Н., Штемлер А.М.* Контроль качества данных БКЗ и других видов каротажа сопротивлений // Прикл. геофизика. – 1970. – Вып. 61. – С. 212 – 220.

*Зунделевич С.М., Сохранов Н.Н. и др.* Система оперативной интерпретации геофизических исследований скважин на ЭВМ («Каротаж»): (Обзор). – М.: ВИЭМС, 1972. – 64 с.

*Зунделевич С.М., Тавризова Е.А., Шкураль Р.М., Шапиро Р.П., Штемлер А.М.* Результаты опробования программ оперативной интерпретации данных промысловой геофизики на ЭВМ // Развед. геофизика. – 1971. – Вып. 47. – С. 93 – 103.

*Ильин В.А., Позняк Э.Г.* Линейная алгебра. – М.: Наука, 1978. – 304 с.

*Ильина Т.Д.* Автоматическая увязка каротажных диаграмм по глубине // Нефтегаз. геология и геофизика. – 1963. – № 7. – С. 45-61.

*Ильина Т.Д., Куликович А.Е., Перьков Н.А., Сохранов Н.Н.* Состояние и перспективы интерпретации геофизических исследований скважин при помощи вычислительных машин // Сов. геология. – 1963. – №5. С. 81 – 89.

*Ильинский В.М.* Боковой каротаж. – М.: Недра, 1971. – 144 с.

*Кауфман А.А.* Теория индукционного каротажа. – М.: Наука, 1965. – 236 с.

*Кауфман А.А., Каганский А.М.* Индукционный метод изучения поперечного сопротивления в скважинах. – Новосибирск: Наука, 1972. – С. 135.

*Кауфман А.А., Каганский А.М., Кривоуский В.С.* Радиальные характеристики индукционных зондов, смещенных относительно оси скважины // Изв. СО АН СССР. Геология и геофизика. – 1974. – №7. – С. 102 – 116.

*Кауфман А.А., Шапиро Р.П.* Разработка кольцевого каротажного индукционного интегратора // Изв. вузов. Геология и разведка. – 1959. – № 10.

*Кашик А.С., Рыхлинский Н.И., Кривонос Р.И.* Способ электрического каротажа обсаженных скважин / Пат. 2200967 Россия, МПК G 01V 3/20. №2002114518/28; Заявл. 04.06.2002; Опубл. 20.03.2003.

*Кейсар З.И.* О связи относительного сопротивления с пористостью, удельной поверхностью и проницаемостью пород // Прикл. геофизика. – 1958. – Вып. 19.

*Кнеллер Л.Е., Потапов А.П.* Определение удельного электрического сопротивления пластов при радиальной и вертикальной неоднородности разреза скважин // Геология и геофизика. – 2010. – №1. – С. 52–64.

*Кнеллер Л.Е., Потапов А.П.* Решение прямой и обратной задач бокового каротажа для целей автоматической интерпретации в тонкослоистом разрезе // Прикладная геофизика. – 1992. – Вып. 128. – С. 137–144.

*Кнеллер Л.Е., Потапов А.П.* Решение прямой и обратной задач электрокаротажа в радиально-неоднородных средах // Геология и геофизика. – 1989а. – №1. – С. 83–96.

*Кнеллер Л.Е., Потапов А.П.* Решение прямой и обратной задач индукционного каротажа с учетом вертикальной и радиальной неоднородности геоэлектрического разреза // Изв. ВУЗов. Сер. Геология и разведка. – 1990. – №9. – С. 95–102.

*Кнеллер Л.Е., Потапов А.П.* Решение прямой и обратной задач электрокаротажа для сред с радиальным градиентом электрического сопротивления / ВНИИ экономики минерал. сырья и геол.-разв. работ. – М.: ВИЭМОС, 1989б. – Вып.8. – С. 3–11.

*Козан И.М.* Сопротивление нефтяных песков электрическому току // Бюл. нефт. геофизики. Вып. 1. – М.: ОНТИ, 1936.

*Колосов А.Л.* Прямые, смешанные и обратные задачи электротриии скважин. – Киев: Наукова думка, 1985. – 196 с.

*Колосов А.Л.* Решение задач электротриии скважин на ЭВМ. – Киев: Наукова думка, 1977. – 148 с.

*Комаров С.Г.* Боковое каротажное зондирование // Азерб. неф. хоз.-во. – 1938. – №9.

*Комаров С.Г.* Геофизические методы исследования скважин. – М.: Гостоптехиздат, 1962. – 368 с.

*Комаров С.Г.* Каротаж по методу сопротивлений, интерпретация. – М.: Гостоптехиздат, 1950. – 168 с.

*Комаров С.Г.* Определение пористости пород по удельному сопротивлению // Прикл. геофизика. – 1956. – Вып. 14. – С. 129 – 155.

*Комаров С.Г., Николаевский Э.Ю., Сохранов Н.Н.* Оценка нефтегазоносности пластов по данным каротажа // Прикл. геофизика. – 1967. – Вып. 54. С. 172 – 184.

*Красножон М.Д.* Інтегрована інтерпретація матеріалів геофізичних досліджень нафтогазових свердловин: Дис. ... д-ра геол. наук. - Киев, 2002. – 311 с.

*Красножон М., Косаченко В., Ручко В.* Технологія «Геопошук» для вивчення нафтогазових родовищ // Геолог України. – 2009. – №1–2. – С. 32–40.

*Кринари А.И.* Опыт определения пористости горных пород по каротажным диаграммам // Нефт. Хоз-во. – 1954. – № 12.

*Куликович А.Е.* Закономерности кривых каротажа сопротивлений // Прикл. геофизика. – 1959. – Вып. 24.

*Куликович А.Е.* Каротажный электроинтегратор ЭКСМ // Прикл. геофизика. – 1962а. – Вып. 34.

*Куликович А.Е.* Палетки бокового каротажного зондирования и методика их применения. – М.: Гостоптехиздат, 1958. – 44 с.

*Куликович А.Е.* Решение задачи теории электрического каротажа в случае смещения источников поля с оси скважины // Прикл. геофизика. – 1962б. – Вып. 32. – С. 122–131.

*Куликович А.Е., Сохранов Н.Н., Чуринова И.М.* Отбивка границ пластов и выделение песчаников по данным электрического каротажа при помощи цифровых вычислительных машин // Прикл. геофизика. – 1964. – Вып. 39. – С. 107–133.

*Курганський В. М., Тішасв І. В.* Електричні та електромагнітні методи дослідження свердловин: Навчальний посібник. – К.: Видавничо-поліграфічний центр "Київський університет", 2011. – 175 с.

*Латышова М.Г.* Практическое руководство по интерпретации диаграмм геофизических методов исследования скважин. – М.: Недра, 1981. – 182 с.

*Магомедов К.М., Хлодов А.С.* Сеточно-характеристические численные методы. – М.: Наука, 1988. – 290 с.

*Мартаков С.В., Эпов М.И.* Прямые двумерные задачи электромагнитного каротажа // Геология и геофизика. – 1999. – 40, №2. – С. 249–254.

*Миронцов М.Л.* Багатозондова апаратура електрометрії нафтогазових свердловин // Наука та інновації. 2018а, 14(3): 57–63.

*Миронцов М.Л.* Вектор сучасних досліджень електрометрії нафтогазових свердловин // Математичне моделювання в економіці. – 2018б. – Vol. 3. – С. 5–25.

*Миронцов Н.Л.* Аппаратурно-методический комплекс для исследования коллекторов аномально низкого сопротивления // Доповіді Національної академії наук України. – 2012а. – № 1. – С. 117–122.

*Миронцов Н.Л.* Метод распознавания "ошибочных" коллекторов и коллекторов остаточного нефтенасыщения при геофизическом исследовании скважин // Доповіді Національної академії наук України. – 2012b. – № 4. – С. 100–106.

*Миронцов Н.Л.* Эффективный метод исследования сложнопостроенных анизотропных пластов-коллекторов в терригенных разрезах // Доповіді Національної академії наук України. – 2012c. – № 5. – С. 119–124.

*Миронцов Н.Л.* Численное моделирование электротометрии скважин. К.: Наукова думка. – 2012d. С. 224.

*Миронцов Н.Л.* Аппаратурно-методический комплекс электрического и индукционного каротажа наклонных и горизонтальных скважин // Геодинаміка. – 2011a. – Т. 32, № 2. – С. 208–209.

*Миронцов Н.Л.* Два новых подхода к реализации многозондового бокового каротажа // Геофизический журнал. – 2011b. – Т. 33, № 1. – С. 91–100.

*Миронцов Н.Л.* Методы факторизации обратной двумерной задачи электрического и индукционного каротажа // Теоретичні та прикладні аспекти геоінформатики. – 2011c. – С. 182–191.

*Миронцов Н.Л.* Оценка влияния погрешности на решение обратной задачи индукционного каротажа // Доповіді Національної академії наук України. – 2011d. – № 4. – С. 111–114.

*Миронцов Н.Л.* Пример эффективного решения обратной задачи многозондового индукционного каротажа // Доповіді Національної академії наук України. – 2011e. – № 5. – С. 119–122.

*Миронцов Н.Л.* Анализ возможностей синтетических зондов низкочастотного индукционного каротажа // НТВ Каротажник. – 2010a. – № 4. – С. 73–87.

*Миронцов Н.Л.* Новый принцип многозондового электрического каротажа // Доповіді Національної академії наук України. – 2010b. – № 6. – С. 103–105.

*Миронцов Н.Л.* Решение задачи определения действительного вертикального профиля проводимости по данным индукционного каротажа // НТВ Каротажник. – 2010c. – № 3. – С. 57–69.

*Миронцов Н.Л.* Методы факторизации обратной двумерной задачи электрического и индукционного каротажа // Сб. тезисов Первой международной конференции «Актуальные проблемы электромагнитных зондирований зондирующих систем». – Киев, 2009a. – С. 8–9.

*Миронцов М.Л.* Практичне застосування неітераційного методу розв'язання рівняння Фредгольма першого роду до задач геофізики // Доповіді Національної академії наук України. – 2009b. – № 5. – С. 149–152.

*Миронцов Н.Л.* Решение прямых и обратных задач электрического и индукционного каротажа методом интегральных (полных) токов / Теоретичні та прикладні аспекти геоінформатики. – Київ. – 2009c. – С. 340–352.

*Миронцов Н.Л.* Способ решения обратной 2D задачи индукционного каротажа // Геофизический журнал. – 2009d. – Т.31, № 4. – С. 196–203.

*Миронцов Н.Л.* Решение уравнения Фредгольма первого рода типа свертки для задач индукционного каротажа // Геофизический журнал. – 2009e. – Т. 31, № 3. – С. 116–120.

*Миронцов М.Л.* Метод розв'язання прямої та зворотної задачі електричного каротажу // Доповіді Національної академії наук України, – 2007a. – №2. – С. 128–13.

*Миронцов М.Л.* Метод розв'язання прямої та оберненої задачі індукційного каротажу // Геофизический журнал, – 2007b. – №5. т.29. – С. 212–214.

*Миронцов М.Л.* Метод розв'язання прямої та оберненої задачі індукційного каротажу // Доповіді Національної академії наук України, – 2004. – №9. – С. 130–133.

*Миронцов М.Л.* До розрахунку коефіцієнтів зондів електричного каротажу // Доповіді Національної академії наук України, – 2003. – №11. – С. 120–122.

*Морозов С.Г.* Методика определения пористости, проницаемости и удельной поверхности пород по данным электрического каротажа // Прикл. геофизика. – 1958. – Вып. 19.

*Нечай А.М.* Определение литологических свойств горных пород по результатам геофизических исследований в скважинах // Прикл. геофизика. – 1954. – Вып. 11.

*Нечай А.М.* Определение минерализации пластовых вод // Прикл. геофизика. – 1952. – Вып. 8.

*Никольский С.М.* Курс математического анализа. Т. II. – М. Наука, 1973. – 392 с.

*Перников Н.А.* Определение пористости терригенных отложений разрезов Башкирии по диаграммам ПС // Прикл. геофизика. – 1957. Вып. 17.

- Пирсон С.* Справочник по интерпретации данных каротажа. – М.: Недра, 1996. – 414 с.
- Плюснин М.И.* Индукционный каротаж. – М.: Недра, 1968. – 140 с.
- Побочина В.И.* Палетки для микрозондов // Прикл. геофизика. – 1959. – Вып. 22. – С. 202–218.
- Попов В.К., Силкина Д.Н., Журавлев В.П.* Определение мощности тонких пластов по данным электрокаротажа // Прикл. геофизика. – 1964. – Вып. 40. – С. 198 – 209.
- Рудяк Б.В.* Взаимное влияние двухкатушечной пары зонда индукционного каротажа // Изв. ВУЗов. Геология и разведка. – 1988. – № 3. – С. 124–126.
- Рындин В.Н., Манюкова А.Г., Кнеллер Л.Е., Гайфуллин Я.С.* Опыт освоения и внедрения системы АСОИГИС/ОС–ГЕО в организациях Мингео СССР // Обмен передовым опытом по обработке материалов ГИС на ЭВМ при исследовании нефтяных скважин с целью повышения их эффективности: Краткие тез. докл. школы передового опыта, г. Калинин, 28 – 30 окт. 1986 г. – Калинин: Союзпромгеофизика, 1986. – С. 3.
- Рыхлинский Н.И., Климов Ю.С., Лохматов В.М., Дробков В.П.* Скважинные испытания наноэлектрического каротажа скважин через обсадную колонну // Каротажник. – 2009. – №183. – С. 71–80.
- Савостьянов Н.А., Чукин В.Т.* Электролитическое моделирование установок // Прикл. геофизика. – 1966. – Вып. 48. – С. 247 – 254.
- Самарский А.А.* Введение в теорию разностных схем. – М.: Наука, 1971. – 552 с.
- Самарский А.А., Гулин А.В.* Численные методы. – М.: Наука, 1989. – 432 с.
- Сеймов В. М., Трофимчук А. Н., Савицкий О. А.* Колебания и волны в слоистых средах. – К.: Наукова думка, 1990. – 222 с.
- Соломасов А.И.* Обработка и интерпретация геофизических исследований в скважинах на ЭВМ в Краснодарском крае // Автоматическая интерпретация промыслово-геофизических данных. Материалы семинара ВДНХ. – М.: ВНИИГеофизика, 1971. – С. 94 – 104.
- Сохранов Н.Н.* Количественная интерпретация данных электрического каротажа в переходной зоне // Прикл. геофизика. – 1960. Вып. 27.
- Сохранов Н.Н.* Машинные методы обработки и интерпретации результатов геофизических исследований скважин. – М.: Недра, 1972. – 232 с.

*Сохранов Н.Н.* Обработка и интерпретация промыслово-геофизических данных при помощи цифровых вычислительных машин // Прикл. геофизика. – 1969а. – Вып. 54. – С. 185 – 202.

*Сохранов Н.Н.* Система обработки промыслово-геофизических данных на ЭВМ // Нефтегаз. геология и геофизика. – 1969б. – № 1. – С. 43 – 45.

*Сохранов Н.Н.* XX век – некоторые вехи биографии нашего каротажа // Каротажник. – 2000. – Вып. 76. С. 30 – 54.

*Сохранов Н.Н., Кулешова Г.К.* Выделение пластов и определение границ по данным БКЗ при помощи вычислительных машин // Прикл. геофизика. – 1968. – Вып. 55. – С. 171 – 184.

*Сохранов Н.Н., Аксельрод С.М.* Обработка и интерпретация с помощью ЭВМ результатов геофизических исследований нефтяных и газовых скважин. – М.: Недра, 1984. – 255 с.

*Страхов В.Н.* О решении некорректных задач магнито- и гравиметрии, представляемых интегральным уравнением типа свертки. I // Физика Земли. – 1967. – № 4. – с. 36–54.

*Табаровский Л.А., Дашевский Ю.А.* Решение задач бокового каротажа методом интегральных уравнений. // Изв. СО АН СССР. Геология и геофизика. – 1976. – №7. – С. 70 – 79.

*Табаровский Л.А., Эпов М.И.* Геометрическая и частотная фокусировка при изучении анизотропных пластов // Электромагнитные методы исследования скважин: Тр. ИГиГ СО АН СССР. – Новосибирск: Наука, 1979. – Вып. 442. – С. 34 – 51.

*Табаровский Л.А., Каганский А.М., Эпов М.И.* Фокусирующие системы индукционного каротажа в анизотропных средах // Изв. СО АН СССР. Сер. Геология и геофизика. – 1977. – №9. – С. 105 – 113.

*Табаровский Л.А., Каганский А.М., Эпов М.И.* Электромагнитное поле гармонического источника в анизотропной цилиндрически слоистой среде // Изв. СО АН СССР. Сер. Геология и геофизика. – 1976. – №3. – С. 94 – 99.

*Техническая инструкция по проведению геофизических исследований и работ приборами на кабеле в нефтяных и газовых скважинах / под. ред. Р.Т. Хаматдинова. – Москва.: ГЕРС, 2002. – 270 с.*

*Технология исследования нефтегазовых скважин на основе ВИКИЗ. Методическое руководство / Под. ред. М.И. Эпова, Ю.Н. Антонова. – Новосибирск: Изд-во СО РАН, 2000. – 121 с.*

- Тихонов А.Н., Арсенин В.Я.* Методы решения некорректных задач. – М. Наука, 1979. – 284 с.
- Тихонов А.Н., Гончарский А.В., Степанов В.В., Ягола А.Г.* Численные методы решения некорректных задач. – М. Наука, 1990. – 320 с.
- Трофимчук А.Н., Гомилко А.М., Савицкий О.А.* Динамика пористоупругих насыщенных жидкостью сред. – К.: Наукова думка, 2003. – 232 с.
- Фок В.А.* Теория каротажа. М. – Л.: ГТТИ, 1933.
- Ханин А.А.* Породы-коллекторы нефти и газа и их изучение. – М.: Недра, 1969. – 368 с.
- Чаадаев Е.В.* Развитие теории и методики интерпретации данных электрического и индукционного каротажа: Дис. ... д-ра техн. наук. – Тверь, 1991. – 522 с.
- Чукин В.Т., Мельников А.Г., Шахмарданов Ш.Ш.* О влиянии неравенства потенциалов электродов зонда на результаты трехэлектродного бокового каротажа // Прикл. геофизика. – 1976. – Вып. 39. – С. 75–82.
- Эйдман И.Е.* Об электрокаротажных параметрах // Прикл. геофизика. – 1976. – Вып. 14.
- Эпов М.И., Глинских В.Н., Ульянов В.Н.* Оценка характеристик пространственного разрешения систем индукционного и высокочастотного каротажа в терригенных разрезах западной Сибири // Каротажник. – 2001. – Вып. 81. – С. 19–57.
- Anderson B.I.* Modeling and inversion methods for the interpretation of resistivity logging tool response. – Delft: DUP Science, 2001. – p.p. 377.
- Anderson B.* The analysis of some unsolved induction interpretation problems using computer modeling // The Log Analyst. – 1986. – 27, N 5. P. 60–73.
- Anderson B.I. Barber T.D.* Induction Logging. – Houston: Schlumberger, 1997. – 45 p.
- Anderson B., Barber T.* Strange induction logs—a catalog of environmental effects // SPWLA 28th Ann. Logging symp. transactions. – Houston: SPWLA, 1987. – Pap. G.
- Anderson B., Barber T.* Using computer modeling to provide missing information for interpreting resistivity logs // SPWLA 29<sup>th</sup> Ann. Logging symp. transactions. – Houston: SPWLA, 1988. – Pap. H.
- Anderson B., Barber N., Singer J., Broussard T.* ELMOD—putting electromagnetic modeling to work to improve resistivity log interpretation // SPWLA 30th Ann. Logging Symp. transactions. – Houston: SPWLA, 1989. – Pap. M.



- Anderson B., Chang S.* Synthetic induction logs by the finite element method // *The Log Analyst*. – 1982. – 23, N 6. – P. 17–26.
- Anderson B., Safinya K. A., Habashy T.* Effects of dipping beds on the response of induction tools // *Proc. Ann. Techn. Conf. and Exhib.* – Houston: Soc. of Petrol. Engineers. 1986. – Pap. 15488.
- Archie G.E.* Introduction to Petrophysics of reservoir rocks // *Bull. Amer. Assoc. Petrol. Geol.* – 1995. – 34, № 6.
- Archie G.E.* The electrical resistivity log as an aid in determining some reservoir characteristics // *Transactions of the AIME, Petrol. Division.* – Englewood, Colorado: Amer. Inst. of Mining and Metallurg. Engineers, 1942. Vol. 146. – P. 54–62.
- Chang S., Anderson B.* Simulation of induction logging by the finite element method // *Geophysics*. – 1984. – 49, №11. P. 1943–1958.
- Doll H.G.* Electrical logging apparatus / Pat. 2,712,628 USA. – 1955a.
- Doll H.G.* Electrical resistivity well logging method and apparatus / Pat. 2,712,627 USA. – 1955b.
- Doll H.G.* Methods and apparatus for electrical logging of wells / Pat. 2,712,630 USA. – 1955c.
- Doll H.G.* The laterolog: A new resistivity logging method with electrodes using an automatic focusing system // *J. Petrol. Technology*. – 1951. – 3, N 11. – P. 305–316.
- Freedman R., Minerbo G.N.* Maximum entropy inversion of induction log data // *SPE Formation Evaluation*. – 1991. 6, N 2. – P. 259–268.
- Frost E., Fertl W. H.* A computerized wellsite log analysis system. Pt I // *The Log Analyst*. – 1980. – Nov. – Dec.
- Frost E., Fertl W.H.* Prolog Wellsite Analysis. Pt. II. // *The log Analyst*. – 1981. – Jan.–Feb.
- Fylling A., Spurlin J.* Induction simulation, the log analysts' perspective // 11th Eur. Formation Evaluation Symp. Transactions. - Harfstiord: Norw. Chap. of SPWLA, 1988. – Pap. T.
- Guyod H.* Electric analogue of resistivity logging // *Geophysics*. – 1955. – 20, №3. P. 615–629.
- Habashy T.M., Chew W.C., Chow E.Y.* Simultaneous reconstruction of permittivity and conductivity profiles in a radially inhomogeneous slab // *Radio Science*. – 1986. – 21, N 4. – P. 635–645.
- Hardman R.H., Shen L.C.* Theory of induction sonde in dipping beds // *Geophysics*. – 1986. – 51, N 3. P. 800–809.

*Hargrave R. T.* Digital computers in log interpretation // Oil in Canada. – 1962. – 14, N 29.

*Heiland C. A.* Geophysical exploration. - New York: Prentice-Hill, Inc., 1940. - 1013 p.

*Henry L., Seeman B.* Methods and apparatus for investigating earth formations wherein a fixed relationship is maintained between emitted current and measured potential difference / Pat. 3,539,910 USA. –1970.

*Horn M.K., Slack N.A.* Comlog a comprehensive computer system for log interpretation // J. Petrol. Technology. – 1962. – 14, N 10.

*Leake J., Shray F.* Logging while drilling keeps horizontal well on small target // Oil and Gas J. – 1991. – 89, N 38. – P. 53–58.

*Lin Y.Y., Gianzero S., Strickland R.* Inversion of induction logging data using the least squares technique // SPWLA 25th Ann. Logging symp. transactions. – Houston: SPWLA, 1984. – Pap. AA.

*Myrontsov M.L.* Multi-Probe Hardware for Electrometry of Oil and Gas Wells // Science and innovation. – 2018. – 14, N 3. – P. 51-56.

*Myrontsov M.L.* Efficient method for solving the resistivity sounding inverse problem // Геофизический журнал. – 2010a. – Т. 32, № 4. – С. 117–119.

*Myrontsov M.L.* Method for improving the spatial resolution of resistivity // Геофизический журнал. – 2010b. – Т. 32, № 4. – С. 119–121.

*Pontecorvo B.* Neutron well logging // Oil and gas J. – 1941. – N 49.

*PS* (спонтанная поляризация) в скважинах. [Материалы фирмы Шлюмберже, 1931 г.]. В кн.: Каротаж. Различные операции в скважинах. Серия руководств по электроразведке, вып. 6. Москва – Грозный – Ленинград – Новосибирск: НГРИ, 1934, С. 21 – 30.

*Schlumberger C. et M.* Communication sur la carottage electric. II Congr. Int. de Forage. - Paris, 1929.

*Sholberg A.* Apparatus for determining the resistivity of a subsurface earth formation at different lateral distances from a borehole wall / Pat. 3,772,589 USA. – 1973.

*Suau J., Grimaldi P., Pupon A., Souhaite P.* The Dual Laterolog-Rxo tool // Proc. SPE Ann. Techn. conf. and Exhib. – Houston: SPE. 1972. Pap. 4018.

*Tonti E.* Finite formulation of the electromagnetic field // Progr. Electromagnetics Res. PIER. – 2001. – 32, 1–44.

*Tuman V.S., Bollman D.* Application of computers to the interpretation of well logs // J. Petrol. Techn. – 1961a. – 13, N 4.

*Tuman V.S., Bollman D.* Digital computer: new exploration tool // *Petrol. management.* – 1961b. – 33, N 12.

*Whitman W.W., Schoen J.H., Towle G.H., Kim J.H.* An automatic inversion of normal resistivity logs // *The Log Analyst.* – 1990. – 31, N 1. – P. 10–19.

# ЗМІСТ

---

---

<b>Передмова</b>	5
<b>Умовні позначення</b>	6
<b>РОЗДІЛ I. ПРЯМІ ЗАДАЧІ</b>	8
Вступ до розділу I	8
<b>ГЛАВА 1. ІСТОРИЧНА РЕТРОСПЕКТИВА РОЗВИТКУ ЕЛЕКТРОМЕТРІЇ</b>	
1.1. Від перших експериментів до кількісної інтерпретації	10
1.2. Розв'язання оберненої задачі на початку ери ЕОМ	19
1.3. Кількісна інтерпретація каротажу на рубежі тисячоліть	24
<b>ГЛАВА 2. ЕЛЕКТРИЧНИЙ КАРОТАЖ</b>	
2.1. Потенціал-зонди та градієнт-зонди	30
2.2. Боковий каротаж	41
<b>ГЛАВА 3. ІНДУКЦІЙНИЙ КАРОТАЖ</b>	
3.1. Фізичні аспекти індукційного каротажу	49
3.2. Відмінність індукційного від електричного каротажу	54
3.3. Апаратура індукційного каротажу	61
3.4. Допоміжні методи електрометрії	75
<b>ГЛАВА 4. ПРЯМІ ЗАДАЧІ ЕЛЕКТРОМЕТРІЇ</b>	
4.1. Вибір числового методу	81
4.2. Базові геоелектричні моделі і їх типові характеристики	85
4.3. Тестування розв'язання прямої задачі	92
Висновки до розділу I	100

## **РОЗДІЛ II. ОБЕРНЕНІ ЗАДАЧІ**

Вступ до розділу II	101
<b>ГЛАВА 5. РОЗВ'ЯЗАННЯ ОБЕРНЕНОЇ ЗАДАЧІ ЕЛЕКТРИЧНОГО КАРОТАЖУ</b>	
5.1. Вертикальні характеристики електричного каротажу	102
5.2. Радіальні характеристики електричного каротажу	117
5.3. Розв'язання оберненої задачі БКЗ+БК	122
<b>ГЛАВА 6. РОЗВ'ЯЗАННЯ ОБЕРНЕНОЇ ЗАДАЧІ ІНДУКЦІЙНОГО КАРОТАЖУ</b>	
6.1. Факторизація оберненої задачі індукційного каротажу	128
6.2. Вплив похибки на розв'язання оберненої задачі	141
6.3. Розв'язання оберненої задачі 4ІК	145
<b>ГЛАВА 7. РОЗВ'ЯЗАННЯ СПІЛЬНОЇ ОБЕРНЕНОЇ ЗАДАЧІ ЕЛЕКТРИЧНОГО ТА ІНДУКЦІЙНОГО КАРОТАЖУ</b>	
1. Швидке розв'язання оберненої задачі	157
2. Розв'язання оберненої задачі БКЗ+БК+ІК	161
3. Розв'язання оберненої задачі БКЗ+БК+ІК+4ІК	170
<b>ГЛАВА 8. ПОХИБКА ТА ЕКВІВАЛЕНТНІ РОЗВ'ЯЗКИ ОБЕРНЕНОЇ ЗАДАЧІ</b>	
8.1. Чи можливий точний розв'язок оберненої задачі?	176
8.2. Розв'язання з урахуванням похибки	182
8.3. Характеристики просторової роздільної здатності	186
8.4. Дослідження областей еквівалентності	191
Висновки до розділу II	197
<b>ВИСНОВКИ</b>	198
Список літератури	199
Зміст	215

Наукове видання

## ЕЛЕКТРОМЕТРІЯ НАФТОГАЗОВИХ СВЕРДЛОВИН

МИРОНЦОВ Микита Леонідович

Київ, ТОВ «Видавництво ЮСТОН», 2019

Українською мовою

Художнє оформлення, технічне редагування, коректура,  
комп'ютерна верстка: М.Л. Миронцов

Підп. До друку 28.02.2019

Формат 60х90/16. Папір офс. №1.

Гарн. Тайме. Друк офс. Фіз. друк. арк. 14,0 + 0,25 вкл.

На крейд, пап. Ум. Друк. Арк. 14,25. Ум. Фарб-відб. 15,5

Обл.-вид. арк. 14,5. Тираж 1000 прим. Зам. № 20022018

Надруковано в ТОВ «Видавництво «Юстон»

01034, м. Київ, вул. О. Гончара 36-а.

тел.: (044)360-22-66.

[www.yuston.com.ua](http://www.yuston.com.ua)

Свідоцтво про внесення суб'єкта видавничої справи до  
державного реєстру видавців, виготовлювачів і  
розповсюджувачів видавничої продукції  
серія ДК № 497 від 09.09.2015 р.