

550.8
© 19

я.с. сапужак

Дивергентная электроразведка

2004

550.8
c 19

АКАДЕМИЯ НАУК УКРАИНСКОЙ ССР
ЛЬВОВСКИЙ ФИЛИАЛ МАТЕМАТИЧЕСКОЙ ФИЗИКИ ИНСТИТУТА МАТЕМАТИКИ

Я. С. САПУЖАК

ДИВЕРГЕНТНАЯ ЭЛЕКТРОРАЗВЕДКА

ТЕУРЧЕСНАЯ	2
БИБЛІОТЕКА	
Шкфр. _____	35607
Льв. № _____	

550.8	35607
c 19	Сапужка Я.
Дивергентная	

Книга должна быть возвращена не
позже указанного здесь срока

Количество предыдущих выдач _____

--	--

63-1071

КИЕВ • НАУКОВА ДУМКА • 1977

573
С19

УДК 550.837

ДИВЕРГЕНТНАЯ ЭЛЕКТРОРАЗВЕДКА. Салузак Я.С. К., "Наук.думка",
1977. 180 с.

В работе изложены основные положения теории и методики детальных электрометрических исследований двусторонними дивергентными установками в естественных и искусственных электрических полях.

С помощью теоретических расчетов и моделирования изучен характер теоретических и экспериментальных графиков различных дивергентных установок над типичными неоднородностями и разработаны основы интерпретации полевых интегралов.

Приводятся также результаты опытных полевых наблюдений на отдельных участках, подтверждающие данные теоретических и экспериментальных исследований.

Ил.52. Список лит.33 назв.

Ответственный редактор Бондаренко А.П.

Рецензенты Сергачк А.Ф., Билинский А.И.

Редакция литературы о Земле .

ОСНОВНЫЕ ОБОЗНАЧЕНИЯ, ПРИНЯТЫЕ В РАБОТЕ

- A, B - положительные и отрицательные питающие электроды соответственно
- $A_{\text{изб}}, A_{\text{средизерад}}$ - амплитуды аномалий на графиках установок, указанных в индексах
- $a - MO - OM'$ - размер полуллипсоида; радиус сферы (гл. 2, 3) и полушара (гл. 3)
- $A_M^{\text{II}}, B_M^{\text{II}}$ - коэффициенты емкости, учитывающие влияние зеркальных изображений питающих электродов A или B от границ раздела сред (верхние индексы) в пунктах наблюдений (нижние индексы)
- d - расстояние между экстремальными точками на графиках (гл. 2) и электрода A до контакта (гл. 3)
- d_M, d_A, d_B - расстояние до приемных или питающих электродов от контакта или центра сферы (гл. 3)
- d_0 - расстояние от центра зондирования до контакта
- E_M^0 - напряженность поля источника или в пункте наблюдения, указанном в нижнем индексе
- $E_{1,2}^0, E_{2,1}^0$ - напряженность поля, рассчитываемая для предельных дивергентных установок (нижние индексы), над телом, указанным в верхнем индексе
- $E' \frac{\partial E}{\partial x} - \frac{\partial^2 U}{\partial x^2}$ - производная напряженности или вторая производная потенциала по направлению x
- E_0 - контактная ЭДС на границе рудного тела с вмещающими породами
- E_1, E_2 - контактные ЭДС на границе наносов с вмещающими породами и пластом соответственно (2.27)
- f - частота переменного электромагнитного поля
- h - глубина залегания центра (верхней границы) естественно поляризованных тел (гл. 2); расстояние между профилями площадной съемки, мощность пласта (гл. 3, § 1)
- H - глубина залегания нижней границы тонкого пласта (2.19)
- h_0 - мощность наносов (гл. 2, 3)
- I - сила тока

- $K_{11(1)}, K_{12(1)}, K_{11(2)}, K_{12(2)}$ - коэффициенты обычных или дивергентных установок, приемные электроды которых указаны в нижних, а питающие - в верхних индексах
- $K_{11(1)} = \frac{K_{11(1)}^0}{K_{11(1)}}, K_{12(1)} = \frac{K_{12(1)}^0}{K_{11(1)}}, K_{11(2)} = \frac{K_{11(2)}^0}{K_{11(2)}}, K_{12(2)} = \frac{K_{12(2)}^0}{K_{11(2)}}$ - отношение коэффициентов
- $\epsilon_{12} = \frac{\rho_2 - \rho_1}{-\rho_2 + \rho_1}$ - коэффициент отражения от границы раздела сред, показанных в индексе
- $L = AB$ - длина питающей линии АВ
- l - половина длины пластообразного тела (2.23) и линейного проводника (гл. 3, § 2) пути фильтрации (2.26)
- M - момент диполя, эквивалентного полю естественно поляризованных тел
- M, O, M' - приемные электроды
- $P_n(\cos \theta)$ - полином Лежандра
- R_{MM} - расстояние между электродами, указанными в индексе
- $r_{11(1)}, r_{12(1)}$ - добавочные сопротивления, подключаемые в полулинии МО к ОМ' в двух вариантах, один из которых заключен в скобки;
- $r_1 = r_2 / 2$ - отношение добавочных сопротивлений
- $S_{1:2}, S_{2:1}$ - суммарная продольная проводимость разреза, определяемая по кривым двусторонних зондирований дивергентными установками
- U_n, U^c - потенциал точки или источника, указанных в нижнем и верхнем индексах соответственно
- ΔU_{MO} - разность потенциалов точек, указанных в индексе
- $\Delta U_{1:1}, \Delta U_{1:2}, \Delta U_{2:1}$ - разности потенциалов, измеряемые дивергентными приемными установками $M r_{11(1)} M', O r_{12(1)} M'$, при соотношении добавочных сопротивлений в полулиниях МО и ОМ', указанных в нижних индексах
- $\Delta \Delta U_{1:2}^{max}, \Delta \Delta U_{2:1}^{min}$ - вторые разности потенциалов
- $\Delta U_{1:2}^{max}, \Delta U_{2:1}^{min}$ - максимальные и минимальные значения разностей потенциалов
- x, y, z - прямоугольные координаты
- $\bar{x}, \bar{y}, \bar{z}$ - приведенные значения координат, выраженные обычно в долях h или d

- x_1, x_2 - координаты точек, указанных в индексах
 α - угол наклона к дневной поверхности плоскости поляризации (гл.2), наклона контакта или оси установки к плоскости вертикального контакта (гл.3)
- α_1, α_2 - углы, под которыми видна поверхность пласта из пункта наблюдения (2.27)
- δ_1, δ_0 - проводимость включения (рудного тела) и внешней среды
- d - половина ширины пластообразной вазели (2.23); мощность пласта (гл.3)
- ϵ - диэлектрическая проницаемость
- ξ - погрешность
- λ - линейная плотность зарядов
- $\mu_{12} = \frac{\rho_2}{\rho_1}, \mu_{23} = \frac{\rho_3}{\rho_2}$ - отношения сопротивлений сред, указанных в индексах
- k - иррациональное число (постоянная)
- ρ_0 - удельное электрическое сопротивление однородной среды
- ρ_1, ρ_2 - истинные сопротивления сред, указанных в индексах
- ρ - кажущееся удельное электрическое сопротивление
- $\rho_{1:2, 2:1}$ - кажущееся удельное электрическое сопротивление, получаемое с помощью прямой (1:2) и обратной (2:1) дивергентных установок
- $\rho^{\max}, \rho^{\min}, \rho^*$ - максимальные, минимальные и экстремальные значения кажущихся удельных электрических сопротивлений
- ρ_A - кажущееся удельное электрическое сопротивление, определяемое с помощью установок, питающие электроды которых показаны в верхнем, а приемные - в нижнем индексах
- $\Delta\rho$ - разность кажущихся сопротивлений
- ΔC - кажущееся сопротивление

- ВЗЗ* - вертикальное электрическое зондирование
- ГЗК-I* - горизонтально-вертикальный контакт с одной вертикальной границей раздела
- ГЗК-II* - горизонтально-вертикальный контакт с двумя вертикальными границами раздела

Предисловие

Детальные электрометрические исследования в настоящее время незаменимы при решении геологических, гидрогеологических и инженерно-геологических задач. Несмотря на интенсивное развитие в последние годы различных модифицированных методов переменного тока, методы постоянных и близких к ним низкочастотных полей (благодаря простоте измерительной аппаратуры и схем, а также достаточно высокой разрешающей способности, превосходящей разрешающую способность методов переменного тока) по-прежнему применяются довольно широко.

Как показывает сравнение результатов различных видов электропрофилирования над проводящей сферой [31], наиболее высокую разрешающую способность имеют дипольные осевые установки. В то же время последние по дифференцированности графиков, как показывают теоретические расчеты, экспериментальные, лабораторные и полевые исследования [21, 22], уступают дивергентным установкам, базирующимся на измерении высших производных электрического потенциала.

К настоящему времени уже накоплен некоторый опыт работ с этими установками в методе сопротивлений, главным образом применительно к поискам и разведке залежей калийных солей в Предкарпатье [22], который позволяет дать высокую оценку эффективности и разведочных возможностей новых способов наблюдений при решении различных геологических задач. Поэтому применение дивергентных установок в других методах электроразведки (естественного поля, заряда и пр.) представляется весьма интересным и актуальным. Особенно это касается методов естественного электрического поля, использование вторых производных которого привлекает внимание исследователей как у нас в стране [5], так и за рубежом [33]. В связи с этим в работе рассмотрены теоретические кривые различных дивергентных установок для более широкого класса естественных электрических полей, чем это было сделано ранее [21].

Дивергентные установки в искусственных электрических полях на протяжении ряда лет успешно применяются при поисках и разведке залежей калийных солей в Прикарпатье [22]. Несомненно, необходимо способствовать им при детальном исследовании для решения иных геологических, инженерных и гидрогеологических задач.

Приведенные в работе примеры являются первыми попытками использовать дивергентные установки для исследования разрезов нефтегазовых месторождений и закарстованных участков.

Расширение подобных исследований и более широкому внедрению дивергентных установок в практику разведки, целесообразность которых вытекает из теоретических расчетов и подтверждается практическими примерами, должна способствовать настоящая работа.

Автор признателен за оказанную помощь при выполнении экспериментальных, полевых и лабораторных исследований, а также теоретических расчетов всем научным сотрудникам, инженерам и техникам, принимавшим участие в этих работах.

Глава I

ОСОБЕННОСТИ РЕГИСТРИРУЕМЫХ ДИВЕРГЕНТНЫМИ УСТАНОВКАМИ ВЕЛИЧИН И СВЯЗЬ ИХ С ОБЫЧНЫМИ УСТАНОВКАМИ

§ 1. ОПРЕДЕЛЕНИЕ И ОБЩИЕ СВОЙСТВА ДИВЕРГЕНТНЫХ УСТАНОВОК

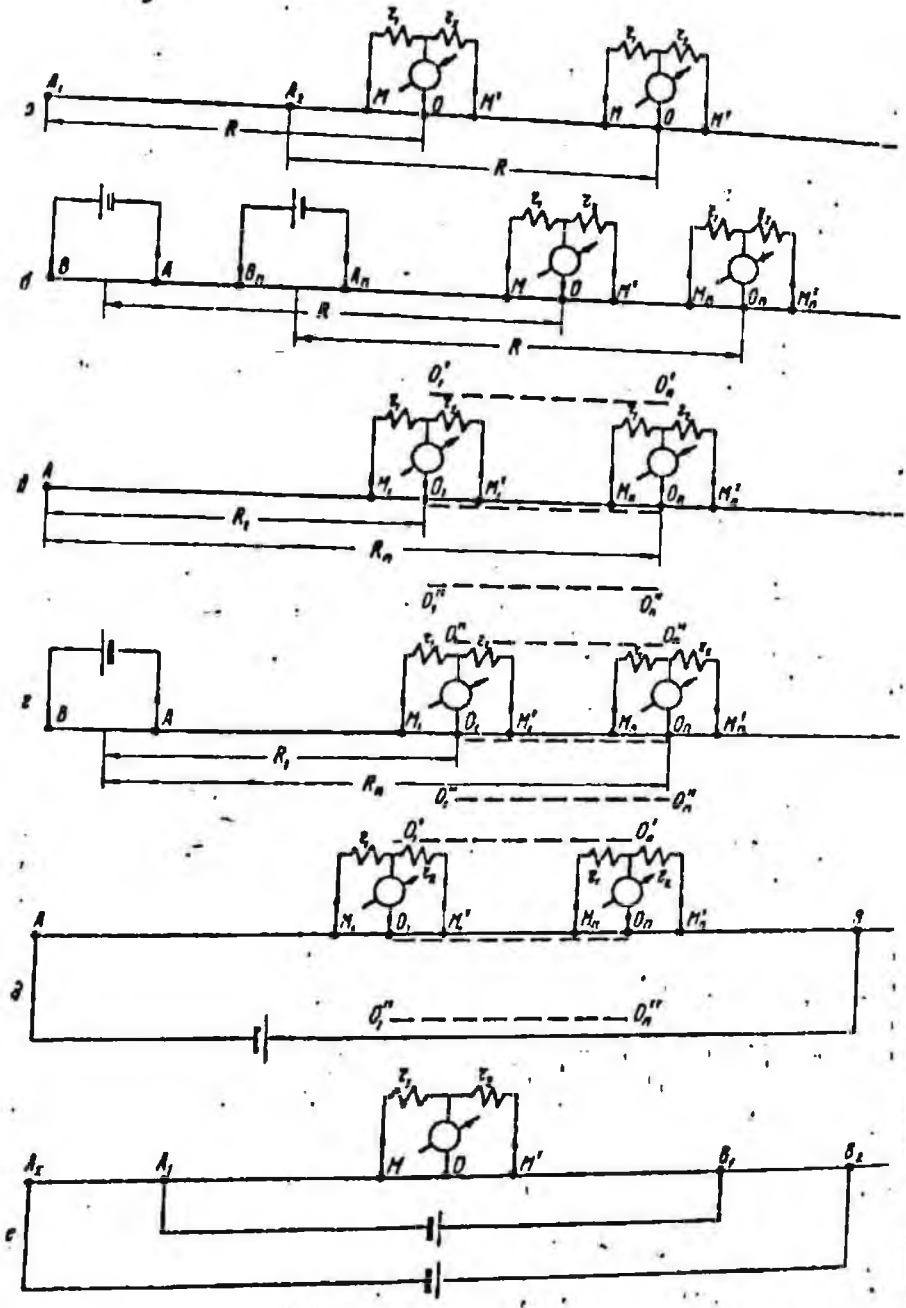
Дивергентными, по аналогии с терминологией Я.М.Альпина для коротких зондов [1], нами названы установки, позволяющие регистрировать вторые и высшие производные (точнее, вторые и высшие разности) электрического потенциала.

Установки, прямо или косвенно связанные с измерением вторых или высших производных, достаточно обстоятельно рассмотрены нами в работе [21]. Поэтому заметим только, что под дивергентными подразумеваются установки с рассматривавшимися ранее симметричными приемными линиями, позволяющими регистрировать разностные аналоги вторых и высших производных, и с асимметричными их разновидностями, характерные особенности которых рассмотрим ниже.

Неотъемлемой составной частью дивергентных установок является трехэлектродная приемная линия M, O, M' (рис. I), позволяющая регистрировать в поле точечного источника, диполя или цепи двух заземлений АВ "чистые" вторые разности при равенстве дополнительных сопротивлений r_1 и r_2 , включаемых в полулучи MO и OM' , или же при $r_1 \neq r_2$, и "смешанные" величины, представляющие собой сумму градиентов и вторых разностей потенциала. В соответствии с принципом взаимности можно проводить дифференцирование и на питающей линии AOA' , однако этот теоретически эквивалентный вариант не рассматривался, так как он требует уравнивания или разветвления на определенные части тока в заземлениях А и А' и для практического применения менее удобен. Поэтому нами основное внимание уделялось совершенствованию приемной установки, в полулучи которой с целью включения процесса уравнивания их сопротивлений сначала было предложено подключать достаточно большие по сравнению с переходными сопротивлениями заземлений одинаковые добавочные сопротивления [21], а затем варьировать их величинами с целью повышения информативности наблюдений [22].

Рассмотрим более детально характер и особенности величин, получаемых с помощью дивергентных установок.

Как показано в работе [21], измеряемая трехэлектродной установкой M, O, M' , величина $\Delta U_{1,1}$ при одинаковых дополнительных сопротивлениях r_1 и r_2 составляет:



$$\Delta U_{F_1} = \frac{U_M + U_{M'}}{2} U_0 - \frac{1}{2} (\Delta U_{MO} - \Delta U_{OM'}) = \frac{1}{2} \Delta \Delta U, \quad (1.1)$$

а при $r_1 \neq r_2$ и $F_1 = r_1/r_2$

$$\Delta U_{r_1 r_2} = \frac{1}{r_1 + r_2} (r_2 \Delta U_{MO} - r_1 \Delta U_{OM'}) = \frac{1}{1 + F_1} (\Delta U_{MO} - F_1' \Delta U_{OM'}), \quad (1.2)$$

или после несложных преобразований

$$\Delta U_{r_1 r_2} = \frac{1}{1 + F_1} [\Delta \Delta U + (1 - F_1) \Delta U_{OM'}] = \frac{1}{1 + F_1} [F_1 \Delta \Delta U + (1 - F_1) \Delta U_{MO}], \quad (1.3)$$

Вдесь U_M , ΔU_{MO} и $\Delta \Delta U$ — потенциалы, градиенты и вторые разности потенциалов, полученные в точках или с помощью линий, указанных в нижних индексах, а $\Delta U_{r_1 r_2}$ — разности потенциалов, регистрируемые дивергентными установками, при соотношении сопротивлений в полулиниях MO и OM', указанных в нижнем индексе.

Выражение (1.3) содержит в явном виде вторые разности потенциалов, и, если последние приближаются к нулю, стремится в зависимости от значения F_1 к величине градиента ΔU_{MO} (при $F_1 = 0$ и $r_2 \rightarrow \infty$) или к $\Delta U_{OM'}$ (при $r_1 \rightarrow \infty$), а в случае $r_1 = r_2$ совпадает с (1.1). Таким образом, при $r_1 \neq r_2$ вторые разности потенциалов регистрируются на фоне значения градиента, что позволяет получать одновременно, меняя местами сопротивления r_1 и r_2 , двусторонние графики кажущихся сопротивлений, близкие по характеру к графикам двусторонних дивергентных установок с одинаковыми добавочными сопротивлениями r_1 и r_2 , но с различной ориентацией питающих электродов. Наряду с этим асимметрия приемной линии позволяет вести наблюдения в наиболее удобном и распространенном на практике поле цепи двух точечных заземлений АВ. При $r_1 = r_2$ последнее характеризуется наличием по центру линии особой точки, в которой $\Delta \Delta U_{1,1} = 0$, что затрудняет представление результатов в привычном виде графиков или кривых КС, так как значения коэффициентов в этой точке стремятся к $\pm \infty$ и терпят разрыв.

Легко показать, что для любых соотношений r_1 и r_2 величина расхождения измеряемых дивергентными установками разностей потенциалов (их алгебраическая сумма) характеризует значение вторых производных на этом интервале;

Рис. 1. Схемы наблюдений дивергентными установками: в поле подвижных (а, б) и фиксированных (в, г) точечного и дипольного источников; в поле цепи АВ — съемка срединных разностей градиентов (д) и двустороннее вондирование (е).

$$\Delta U_{r_1, r_2} + \Delta U_{r_2, r_1} = \Delta U_{r_1, 1} \quad (1.4)$$

На основании теоретических расчетов и моделирования в качестве оптимального выбрано $r_1 : r_2 = 1:2$ и $2:1$ [22]; при этом величина сопротивления, принимаемого за единицу, колебалась в пределах 3 - 5 кОм. При таких значениях добавочных сопротивлений производились все расчеты теоретических графиков (хотя исходные формулы записывались в общем виде), и велась полевая наблюдение. Для этого частного случая из (1.3) легко получить как выражения для кривых $\Delta U_{1:2}$ и $\Delta U_{2:1}$, которые для определенности назовем прямой и обратной:

$$\Delta U_{1:2} = \frac{1}{3}(2\Delta U_{MO} - \Delta U_{OM'}) = \frac{1}{3}(\Delta\Delta U + \Delta U_{MO}) = \frac{1}{3}(2\Delta\Delta U + \Delta U_{OM'}), \quad (1.5)$$

$$\Delta U_{2:1} = \frac{1}{3}(\Delta U_{MO} - 2\Delta U_{OM'}) = \frac{1}{3}(2\Delta\Delta U - \Delta U_{MO}) = \frac{1}{3}(\Delta\Delta U - \Delta U_{OM'}), \quad (1.6)$$

так и обратные соотношения

$$\Delta U_{MO} = 2\Delta U_{1:2} - \Delta U_{2:1}, \quad (1.7)$$

$$\Delta U_{OM'} = \Delta U_{1:2} - 2\Delta U_{2:1}. \quad (1.8)$$

Поскольку величины, определяемые с помощью обычных градиентных и дивергентных установок взаимосвязаны, то измерять можно одни, а другие - рассчитывать, соотносясь с вопросами технических удобств и точности. С точки зрения последней, предпочтительно регистрировать непосредственно вторые разности и хуже вычислять их как разности наблюдаемых градиентов. Промежуточное положение занимает дивергентные величины $\Delta U_{1:2}$ и $\Delta U_{2:1}$, точность регистрации которых (при одинаковой погрешности измерительной аппаратуры) выше, чем точность регистрации градиентов, но ниже, чем вторых производных. Так, при значениях $\Delta U_{MO} = 100$ мВ и $\Delta U_{OM'} = 80$ мВ, измеренных с точностью 5%, получаем рассчитанные величины $\Delta U_{1:1} = 10 \pm 4,5$ мВ, т.е. с относительной погрешностью $\varepsilon = 45\%$,

$$\Delta U_{1:2} = 40 \pm 4,7 \text{ мВ } (\varepsilon \approx 12\%),$$

$$\Delta U_{2:1} = 20 \pm 4,3 \text{ мВ } (\varepsilon \approx 22\%).$$

При непосредственной регистрации тех же величин идентичным прибором относительная погрешность всех измерений будет одинакова и составит всего 5%, или по абсолютным значениям $\Delta U_{1:1} = 10 \pm 0,5 \text{ мВ}$, $\Delta U_{2:1} = 20 \pm 1 \text{ мВ}$, $\Delta U_{1:2} = 40 \pm 2 \text{ мВ}$.

Этот пример наглядно иллюстрирует преимущество непосредственной регистрации вторых разностей потенциалов по сравнению с вычислением их по градиентам.

При расчетах $\Delta U_{1:1}$ по данным наблюдений дивергентными установками $\Delta U_{1:2}$ и $\Delta U_{2:1}$ погрешность уменьшается в три раза ($\Delta U_{1:1} = 10 \pm 1,5 \text{ мВ}$), т.е. сокращается до 15%. Это следует и непосредственно из расчетных формул (1.5) и (1.6), которые при $\Delta U_{MO} = \Delta U_{OM}'$ дают

$$\begin{aligned} \Delta U_{1:2} &= \frac{1}{3} \Delta U_{MO}, & \Delta U_{2:1} &= -\frac{1}{3} \Delta U_{OM}', \\ \epsilon \Delta U_{1:2} &= \epsilon \Delta U_{2:1} = \frac{1}{3} \epsilon \Delta U_{MO} = \frac{1}{3} \epsilon \Delta U_{OM}'. \end{aligned} \quad (1.9)$$

Учитывая повышенную точность, а также технико-методические преимущества, дивергентные измерения $\Delta U_{1:2}$ и $\Delta U_{2:1}$ мы приняли в качестве основных при полевых наблюдениях и использовали непосредственно для определения кажущихся сопротивлений или расчета других, связанных с ними величин.

По выражениям (1.5) и (1.6) можно определять и предельный вид величин $\Delta U_{1:2}$ и $\Delta U_{2:1}$, что дает возможность рассчитывать их по выражениям для градиента и второй производной потенциала. Поскольку в формулах (1.5) и (1.6) точки записи градиентов и вторых разностей не совпадают и смещены на половину интервала MO (или $0,5 \Delta \Delta U$), формулы для расчета предельных значений $E_{1:2}$ и $E_{2:1}$ по значениям градиентов и вторых производных в произвольном пункте будут иметь вид:

$$E_{1:2} = \frac{1}{3} (E + \frac{3}{2} E'), \quad (1.10)$$

$$E_{2:1} = \frac{1}{3} (-E + \frac{3}{2} E'). \quad (1.11)$$

Характерно, что в этом случае также

$$E_{1:2} + E_{2:1} = E', \quad (1.12)$$

т.е. расхождение графиков прямой и обратной предельных установок и здесь определяет величину второй производной потенциала.

Полученные таким образом значения $E_{1;2}$ и $E_{2;1}$ могут, как и их разностные аналоги, использоваться для расчетов КС (в методе сопротивления) или прямо для интерпретации практических графиков, в частности в методе естественного электрического поля.

§ 2. ТИПЫ ДИВЕРГЕНТНЫХ УСТАНОВОК. ИЗОБРАЖЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ НАБЛЮДЕНИЙ И ОЦЕНКА ИХ РАЗРЕШАЮЩЕЙ СПОСОБНОСТИ

Рассмотрим кратко основные виды дивергентных установок, неотъемлемым составным элементом которых является трехэлектродная приемная линия для регистрации "чистых" или "смешанных" вторых разностей потенциалов в поле произвольных источников.

В методе сопротивления в качестве источников поля используются обычно точечные заземления, диполи, длинная линия АВ и ряде линейные электроды. В комплексе с приемной линией $M_{1,2,3} O_{2,1,3} M'$ они могут образовывать различного вида питающие дивергентные установки (рис. 1). Последние можно подразделить на профилирование в поле точечного источника и диполя, которые могут быть подвижными ($A \rightarrow M_{1,2,3} O_{2,1,3} M'$ и $BA \rightarrow M_{1,2,3} O_{2,1,3} M'$) или фиксированными ($A \rightarrow M_{1,2,3} O_{2,1,3} M'$ и $BA \rightarrow M_{1,2,3} O_{2,1,3} M'$); съемку срединных разностей градиентов в поле цепи двух точечных ($A \rightarrow M_{1,2,3} O_{2,1,3} M' \rightarrow B$) или линейных ($A \rightarrow M_{1,2,3} O_{2,1,3} M' \rightarrow B$) электродов, а также на зондирование двусторонними установками ($A \rightarrow M_{1,2,3} O_{2,1,3} M' \rightarrow B$).

Из всех этих разновидностей нами выбраны как наиболее удобные установки $A \rightarrow M_{1,2,3} O_{2,1,3} M'$ для теоретического анализа и $A \rightarrow M_{1,2,3} O_{2,1,3} M' \rightarrow B$ для полевых наблюдений.

Частично свойства и характер графиков КС в неоднородных средах некоторых из перечисленных установок уже описывались в наших предыдущих работах [21, 22]. Поэтому в дальнейшем будем касаться преимущественно тех особенностей указанных установок и характера их графиков над неоднородностями, которые не рассматривались ранее.

Результаты наблюдений дивергентными установками в методе сопротивления наиболее удобно изображать в виде графиков и кривых кажущихся сопротивлений, которые лучше всего отображают характерные особенности разреза и в ряде случаев позволяют непосредственно по наблюдаемым кривым определять некоторые его параметры. Значения КС (R_k дивергентных установок, обозначаемые для краткости без индекса "к") рассчитываются по формуле

$$R_{1,2(2;1)} = K \frac{\Delta U_{1,2(2;1)}}{I} \quad (1.13)$$

где $K_{1,2(2;1)}$ - коэффициенты установок, определяемые из условия равенства кажущихся сопротивлений дивергентных установок в однородной среде ее истинному сопротивлению.

Выражения для коэффициентов установок $A \rightarrow M_{1,2,3} O_{2,1,3} M'$ (K^A) и $A \rightarrow M_{1,2,3} O_{2,1,3} M' \rightarrow B$ (K^{AB}) будут иметь вид

$$K_{1,2(2;1)}^A = \frac{2\epsilon}{\frac{r_{11}}{r_1 + r_2} \left(\frac{1}{\epsilon_{AM}} - \frac{1}{\epsilon_{BM}} \right) + \frac{r_{22}}{r_1 + r_2} \left(\frac{1}{\epsilon_{AM}} - \frac{1}{\epsilon_{BM}} \right) - \frac{1}{\epsilon_{AO}}} \quad (1.14)$$

$$K_{1,2(2;1)}^{AB} = \frac{2\epsilon}{\frac{r_{11}}{r_1 + r_2} \left(\frac{1}{\epsilon_{AM}} - \frac{1}{\epsilon_{BM}} \right) + \frac{r_{22}}{r_1 + r_2} \left(\frac{1}{\epsilon_{AM}} - \frac{1}{\epsilon_{BM}} \right) - \left(\frac{1}{\epsilon_{AO}} - \frac{1}{\epsilon_{BO}} \right)} \quad (1.15)$$

Здесь ϵ_{AM} , ϵ_{BM} - расстояния между питающими и приемными электродами, которые указаны в индексках; при этом $\epsilon_{AO} = \epsilon_{AM} - a = -\epsilon_{AM} + a$; $\epsilon_{BO} = \epsilon_{BM} - a = \epsilon_{BM} + a$, где $a = \epsilon_{MO} = \epsilon_{OM}$ - размер приемной полулинии. Формулы справедливы, если силу тока и разность потенциалов выразить в основных единицах систем или их долях, а при обычных на практике измерениях силы тока в сантамперах и разностей потенциалов в милливольтгах необходимо в них ввести множитель 0,1. Рассчитанные с помощью таких коэффициентов кажущиеся сопротивления любой дивергентной установки в однородной среде равняются истинным. Такой способ изображения результатов является привычным и удобным, так как позволяет определять сопротивления вмядающих или контактирующих сред непосредственно по характеру графиков КС за пределами неоднородностей.

В методе естественного электрического поля обычно регистрируются возникающие в земле потенциалы окислительно-восстановительного, фильтрационного или иного происхождения. Поэтому для дивергентных наблюдений в этих полях достаточно только одной приемной линии $M_{1,2,3} O_{2,1,3} M'$, с помощью которой в каждой точке профиля или их систем измеряются величины $\Delta U_{1,2}$ и $\Delta U_{2,1}$. Учитывая, что координаты источника естественного поля до постановки наблюдений, как правило, неизвестны и определять коэффициенты установок по аналогии с методом сопротивления нельзя, на графиках целесообразно наносить непосредственно измеряемые величины, откладываемые в за-

зависимости от пределов их изменения в линейных или логарифмических масштабах,

Несколько сложнее вопрос о выборе размеров приемной линии $M_{1,2} \sigma_{1,2} M'$. С одной стороны, величина ее определяется техническими факторами, среди которых главным является уровень измеряемых величин, фон помех и чувствительность регистрирующей аппаратуры, а с другой - она есть аналогом шага трансформации гравитационных полей (g) и оптимальные ее размеры зависят от глубины залегания искоемых объектов (h).

В работе [17] на примере поля точечного источника показано, что рациональные размеры шага трансформации как с точки зрения масштабности приращений вторых производных силы тяжести, так и дифференциации аномалий находятся в пределах $0,2h - 0,5h$. Очевидно, в таких пределах целесообразно выбирать и размеры приемных линий, если они не выходят за рамки допустимых технических условий. В пределах одного профиля, планшета или участка лучше всего применять установки одинаковых размеров, так как связь последних с величинами $\Delta U_{1,2}$ и $\Delta U_{2,1}$ сложнее, чем для градиентов и вторых разностей потенциала. В общем виде эту зависимость можно получить из выражений для коэффициентов дивергентных установок (1.14), (1.15) в виде соотношения $\frac{\Delta U_{1,2}^2(2:1)}{\Delta U_{2,1}^2(1:1)} = \frac{a_2^2(R+a_2)}{a_1^2(R+a_1)}$; которое, кроме размеров первой и второй полулиний (a_1 и a_2), содержит также расстояние до источника тока R . Если последнее мало, т.е. когда $R \ll 3a_1$ [2] и им можно пренебречь, увеличение (или уменьшение) приемной линии влечет за собой возрастание (или убывание) регистрируемых дивергентными установками величин, пропорциональное, подобно вторым производным, квадрату отношения длин линий $-(a_2/a_1)^2$. При значительном удалении от источника, т.е. $R \gg 3a_1$ [2], что намного чаще встречается на практике, изменение $\Delta U_{1,2}^2(2:1)$ соответствует, как и для обычных градиентов, примерно первой степени отношения длин полулиний, т.е. a_2/a_1 . Именно последним выражением, как наиболее близким к условиям реальной геологической обстановки, можно пользоваться при сводных построениях результатов наблюдения дивергентными установками различных размеров.

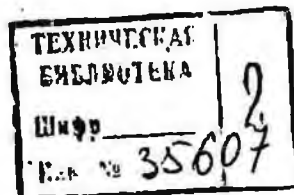
Из приведенного описания нетрудно убедиться, что при выборе способов изображения результатов наблюдения дивергентными установками, как обычно, преследуется цель добиться максимальной простоты (прямолинейности) получаемых графиков в однородных (или безаномаль-

ных) средах. Всякое отклонение от прямой линии, наблюдающееся в неоднородных средах или при наличии источников естественных электрических полей, можно рассматривать как аномалию, вызванную неоднородностями или источниками поля в разрезе. Вид аномалии, определяемый чередованием экстремумов или других характерных точек графиков, площадок равных значений или резких омен кажущихся сопротивлений, вторых разностей и т.п., зависит от типа неоднородности и применяемой установки. Зная конфигурацию теоретических кривых тех или иных установок над различными неоднородностями, по характеру аномалии, можно локализовать местоположение неоднородности на профиле и оценить ее природу, в связи с чем изучению аномальных полей всегда уделяется большое внимание.

Не останавливаясь на особенностях аномалий дивергентных установок над различными неоднородностями, которые будут предметом обсуждения в последующих главах, коснемся здесь только частного, но очень важного и необходимого нам при рассмотрении взаимосвязи РС обычных и дивергентных установок для сравнительной оценки их разрешающей способности вопроса об определении величины или интенсивности аномалии. Последняя, как и вид аномалии, зависит от характера неоднородности разреза и дифференциации его по сопротивлениям, определяется, как показано в [67], преимущественно отношением сопротивлений контактирующих сред, а также типом применяемых установок. Вполне очевидно, что чем более четко выражена аномалия, тем легче установить местоположение и природу возмущающего объекта и тем выше разрешающая способность установки.

Для количественной оценки интенсивности аномалии обычно применяется числовое выражение $(\rho_{\text{макс}} - \rho_{\text{мин}}) / \rho_0$, где $\rho_{\text{макс}}$, $\rho_{\text{мин}}$ и ρ_0 - соответственно значения кажущегося сопротивления в экстремальных точках и в нормальном поле за пределами аномалии. Однако в связи с тем, что последнее определяется не всегда однозначно, в частности для контакта двух сред, используются и другие способы оценки величины аномалии, не связанные с определением сопротивления вмещающей среды. К таким способам можно отнести введенное И.Х.Блохом [67] понятие амплитуды аномалии, определяемой отношением $\rho_{\text{макс}} / \rho_{\text{мин}}$ в аномальной зоне, или предложенное А.Г.Тарховым соотношение

$$\frac{\rho_{\text{макс}} - \rho_{\text{мин}}}{\rho_{\text{макс}} + \rho_{\text{мин}}} \quad (1.16)$$



Выражение (1.16) является наиболее подходящим для оценки разрешающей способности дивергентных установок, так как правильно отражает появление отрицательных значений КС в минимумах аномалии, т.е. растет по мере увеличения амплитуды аномалии с переходом минимальных значения в отрицательную область. Учитывая универсальность соотношения (1.16), применимого для любых неоднородностей и установок, оно выбрано нами как наиболее подходящее для сравнительной оценки разрешающей способности дивергентных и обычных установок в методе сопротивления ч им мы будем пользоваться в дальнейшем.

Специальная оценка амплитуды аномалии вполне применима и для других методов: естественного поля, вярда и т.п. Применительно к методам, в которых изображаются непосредственно регистрируемые величины, ее можно записать в виде

$$\frac{\Delta U_{\text{МАКС}}^{\text{МАКС}} - \Delta U_{\text{МИН}}^{\text{МИН}}}{\Delta U_{\text{МАКС}}^{\text{МАКС}} + \Delta U_{\text{МИН}}^{\text{МИН}}} \quad (1.16a)$$

Учитывая, в этом случае появление отрицательных значений на графиках будет также сопровождаться увеличением амплитуды аномалии.

Безусловно из соответствующей действительности результаты (что неизвестно известно и выражения (1.16) для КС) формула дает, значения $\Delta U_{\text{МАКС}}^{\text{МАКС}}$ и $\Delta U_{\text{МИН}}^{\text{МИН}}$ равны по амплитуде и противоположны по знаку, в этом случае выражения (1.16) и (1.16a) из-за появления нуля в знаменателе стремятся к бесконечности, что не отражает действительности экстремумов. Вероятно, в таких случаях разность экстремальных значений необходимо относить к фоновым значениям графика для АА, если последние стремятся к нулевой линии, определять разность отклонения экстремумов или логарифмическую амплитуду экстремумов (1.17).

Интерес представляют вопросы оценки амплитуды аномалии и разрешающей способности графика ΔU и КС различных дивергентных установок будут рассмотрены при рассмотрении характера их теоретических графиков для различных амплитуд аномалии и сопоставлении их с теоретическими кривыми для обычных установок, регистрирующих градиенты потенциала. Следует заметить, что в целях обеспечения одинакового подхода и получения сопоставимых результатов критерии оценки разрешающей способности дивергентных и обычных установок будут общими.

§ 3. СВЯЗЬ КАЖУЩИХСЯ СОПРОТИВЛЕНИЙ, ОПРЕДЕЛЯЕМЫХ С ПОМОЩЬЮ ДИВЕРГЕНТНЫХ И ОБЫЧНЫХ УСТАНОВОК

Как и всякую сложную систему электродов, любую дивергентную установку, например АМОМ', можно представить как одну сложившуюся из простых трех потенциал-установок АМ, АО и АМ' или двух градиент-установок АМО и АОМ'. Связь между величинами, непосредственно регистрируемыми простыми и дивергентными установками, была показана выше. Однако для практического пользования более удобны соотношения между кажущимися сопротивлениями, которыми представлены обычно результаты как теоретических расчетов, так и полевых наблюдений.

Переход от одних соотношений к другим легко осуществить, используя вытекающую из основной формулы определения КС связь $\frac{\Delta U}{I} = \frac{\rho}{K}$. При одинаковой силе тока получим:

для установки АМГ₁₂₁₁ОГ₂₁₁₁М'

$$\frac{\rho_{11}^A}{K_{11}^A} = \frac{1}{2} \left(\frac{\rho_M^A}{K_M^A} + \frac{\rho_{M'}^A}{K_{M'}^A} \right) = \frac{\rho_0^A}{K_0^A} = \frac{1}{2} \left(\frac{\rho_{MO}^A}{K_{MO}^A} - \frac{\rho_{OM'}^A}{K_{OM'}^A} \right), \quad (1.17)$$

$$\frac{\rho_{1211}^A}{K_{1211}^A} = \frac{1}{r_1 + r_2} \left[r_{2111} \frac{\rho_M^A}{K_M^A} + r_{1211} \frac{\rho_{M'}^A}{K_{M'}^A} \right] \frac{\rho_0^A}{K_0^A} = - \frac{1}{r_1 + r_2} \left[r_{2111} \frac{\rho_{MO}^A}{K_{MO}^A} - r_{1211} \frac{\rho_{OM'}^A}{K_{OM'}^A} \right]; \quad (1.18)$$

для установок А = АГ₁₂₁₁ОГ₂₁₁₁М' = А

$$\frac{\rho_{1211}^{AB}}{K_{1211}^{AB}} = \frac{1}{r_1 + r_2} \left[r_{2111} \left(\frac{\rho_M^A}{K_M^A} - \frac{\rho_{M'}^A}{K_{M'}^A} \right) + r_{1211} \left(\frac{\rho_{M'}^A}{K_{M'}^A} - \frac{\rho_M^A}{K_M^A} \right) \right] \left(\frac{\rho_0^A}{K_0^A} - \frac{\rho_0^B}{K_0^B} \right) = \frac{1}{r_1 + r_2} \left[r_{2111} \frac{\rho_{MO}^{AB}}{K_{MO}^{AB}} - r_{1211} \frac{\rho_{OM'}^{AB}}{K_{OM'}^{AB}} \right]; \quad (1.19)$$

В этих формулах в нижнем индексе при ρ и K указаны применяемые электроды или линии, а в верхнем - питающие, в поле которых определены коэффициенты и кажущиеся сопротивления.

Все коэффициенты взаимосвязаны, и между ними существуют следующие соотношения:

$$K_{M[0; M']}^{A[B]} = 2K_{M[0; M']}^{A[B]} ; K_{M[0; M']}^{AB} = \frac{K_{M[0; M']}^A K_{M[0; M']}^B}{K_{M[0; M']}^B - K_{M[0; M']}^A} \quad (I.20)$$

$$K_{M[0; M']}^{AB} = \frac{K_{M[0; M']}^A K_{M[0; M']}^B}{K_{M[0; M']}^B - K_{M[0; M']}^A} \quad (I.20a)$$

$$K_{1:1}^{A[B]} = \frac{2K_{MO}^{A[B]} - K_{OM'}^{A[B]}}{K_{OM'}^{A[B]} - K_{MO}^{A[B]}} \quad (I.21)$$

$$K_{1:2:1:1}^{A[B]} = \frac{K_{MO}^{A[B]} K_{OM'}^{A[B]}}{\frac{r_{11}}{r_1 + r_2} K_{OM'}^{A[B]} - \frac{r_{12}}{r_1 + r_2} K_{MO}^{A[B]}} \quad (I.22)$$

Формулы (I.21) и (I.22) остаются справедливыми, если точечные питающие электроды (А или В) заменить линией АВ.

Соотношения (I.17) - (I.19) с учетом значений коэффициентов симметричных установок, когда $R_{AO} = R_{BO}$, $R_{AM} = R_{BM}$ и $R_{AM'} = R_{BM'} \cdot \bar{K}_{OM}^{AB} = 1$, могут быть использованы для пересчета как теоретических, так и практических кривых профилирования или зондирования в графиках КС дивергентных установок. Такие операции вполне правомерны для теоретических расчетов, если имеются табличные исходные данные, а для практических кривых, как подчеркивалось в [6] и отмечалось выше, должны предъявляться повышенные требования к точности первичных материалов.

Для практического использования формулы (I.17) - (I.19) можно привести к более удобной форме, которая для расчета КС дивергентных установок по наиболее распространенным данным градиент-установок примет вид:

$$\rho_{1:1} = \rho_{MO} - \frac{1}{\bar{K}_{OM} - 1} \Delta \rho_{MM'}$$

$$\rho_{1:2} = \rho_{MO} + \frac{1}{2\bar{K}_{OM} - 1} \Delta \rho_{MM'}$$

$$\rho_{2:1} = \rho_{MO} + \frac{2}{\bar{K}_{OM} - 2} \Delta \rho_{MM'} \quad (I.25)$$

где $\bar{K}_{OM} = \frac{K_{OM'}}{K_{MO}}$ и $\Delta \rho_{MM'} = \rho_{MO} - \rho_{OM'}$.
 Верхние индексы у ρ и K здесь не поставлены, так как формулы справедливы для любого источника тока. Это означает, что если за исходные брать значения КС градиент-установок $A \rightarrow MN$ или $A \rightarrow MN \rightarrow B$, то и результирующие кривые получим для установок $A \rightarrow M_{1(12)} O_{2(11)} M'$ и $A \rightarrow M_{1(12)} O_{2(11)} M' \rightarrow B$ соответственно (при этом $MO = OM' = MN$).

При пересчетах следует учитывать изменения коэффициента $K_{OM'}$, который для поля одного электрода А и цепи двух заземлений АВ существенно отличается и определяется по формулам

$$\bar{K}_{OM'}^A = \frac{K_{OM'}^A}{K_{MO}^A} = \frac{R_{AM'}}{R_{AM}} \quad (I.26)$$

$$K_{AB}^{OM'} = \frac{R_{AM'} \cdot R_{BM'} (R_{AM} \cdot R_{AO} + R_{BM} \cdot R_{BO})}{R_{AM} \cdot R_{BM} (R_{AO} \cdot R_{AM'} + R_{BO} \cdot R_{BM'})}$$

Приведенные выражения позволяют легко установить, что для сим-

метричных установок, когда $R_{AO} = R_{BO}$, $R_{AM} = R_{BM}$ и $R_{AM'} = R_{BM'} \cdot \bar{K}_{OM}^{AB} = 1$, формулы (I.24) и (I.25) упрощаются и приобретают вид:

$$\rho_{1:1} = \rho_{MO} + \Delta \rho_{MM'} = 2\rho_{MO} - \rho_{OM'} \quad (I.27)$$

$$\rho_{2:1} = \rho_{MO} - 2\Delta \rho_{MM'} = 2\rho_{OM'} - \rho_{MO} \quad (I.28)$$

а выражение (I.23) в соответствии с приводившимися выше замечаниями теряет смысл, так как правая его часть превращается в величину бесконечность.

Для полноты картины приведем также формулы для получения величин ρ_{MO}^{AB} и $\rho_{OM'}^{AB}$, являющихся исходными по отношению к $\rho_{1:2}$ и $\rho_{2:1}$ и рассчитываемых обычно по измерениям в альбомах теоретических кривых установок $A \rightarrow MN$ и $MN \rightarrow B$:

$$\rho_{MO[OM']}^{AB} = \rho_{MO[OM']}^A - \frac{1}{\bar{K}_{MO[OM']}^B + 1} \Delta \rho_{MO[OM']}^{AB} \quad (I.24a)$$

~~... выражения (1.23) - (1.25) можно сделать~~
~~... заключения. Так, в частности, если $\Delta \rho_{MN}^A$~~
~~... представляет собой прямую линию, параллельную~~
~~... кривые всех дивергентных установок~~
~~... всегда следует, что площади равных~~
~~... например, на графиках профилирования~~
~~... будут общими для обычных и дивергентных~~
~~... в этих случаях последних будут совпадать с~~
~~... (максимумами и минимумами) исходных~~
~~... эти особенности полностью подтверждаются~~
~~... расчетных расчетов, так и экспериментальными~~
~~... наблюдениями.~~
~~... также, что~~

$$\rho_{1:2}^A = \rho_{MN}^A + \frac{5\bar{K}_{MN}^B - 4}{(2\bar{K}_{MN}^B - 1)(\bar{K}_{MN}^B + 2)} \Delta \rho_{MN}^{AB}$$

$$\rho_{2:1}^A = \frac{3\bar{K}_{MN}^B}{(2\bar{K}_{MN}^B - 1)(2\bar{K}_{MN}^B + 1)} \Delta \rho_{MN}^{AB}$$

$$\rho_{1:2}^A + \rho_{2:1}^A = \rho_{MN}^A + \rho_{MN}^{AB}$$

$$\rho_{1:2}^A - \rho_{2:1}^A = 2(\rho_{MN}^A - \rho_{MN}^{AB}) = 2\rho_{MN}^B$$

... еще раз подтверждает вывод о том, что видят
 ... установок втрое больше, чем обычных.
 ... (1.23) и (1.25) получены для случая, когда питающая
 ... линия, поэтому
 ... результаты
 ... методом оценки средних значений градиента
 ... Они могут быть также использованы
 ... (или упоминавшихся
 ... графиков среднего градиента

$MN \rightarrow B$ в кривые дивергентных установок. За исходные ρ_{MN}^A и ρ_{MN}^B следует принимать поочередно пару соседних значений на графике и в каждой из них определять свое отношение коэффициентов. Применительно к зондированию дивергентными установками и когда приемная линия остается на месте, а параллельно ей перемещаются только питающие электроды, формулы для пересчета кривых обычных трехэлектродных установок $A \rightarrow MN$ и $MN \rightarrow B$ можно написать в общем виде следующим образом:

$$\rho_{1:2}^{AB} = \rho_{MN}^A - \frac{1}{2\bar{K}_{MN}^B + 1} \Delta \rho_{MN}^{AB} \quad (1.31)$$

$$\rho_{2:1}^{AB} = \rho_{MN}^A - \frac{2}{\bar{K}_{MN}^B + 2} \Delta \rho_{MN}^{AB} \quad (1.32)$$

... по-прежнему $\Delta \rho_{MN}^{AB} = \rho_{MN}^A - \rho_{MN}^B$, $\bar{K}_{MN}^B = \frac{K_{MN}^B}{K_{MN}^A} = \frac{R_{MN}^B R_{MN}^A}{R_{MN}^A R_{MN}^B}$, ρ_{MN}^A и ρ_{MN}^B - кажущиеся сопротивления и коэффициенты трехэлектродных установок, показанных в индексах.

(1.2) Для симметричной установки $K_{MN}^A = K_{MN}^B$ выражения (1.31) и (1.32) упрощаются:

$$\rho_{1:2}^{AB} = \rho_{MN}^A - \frac{1}{3} \Delta \rho_{MN}^{AB} \quad (1.31a)$$

$$\rho_{2:1}^{AB} = \rho_{MN}^A - \frac{2}{3} \Delta \rho_{MN}^{AB} \quad (1.31a')$$

По аналогии с предыдущим найдем

$$\rho_{1:2}^{AB} + \rho_{2:1}^{AB} = 2\rho_{MN}^A - \frac{5\bar{K}_{MN}^B + 4}{(2\bar{K}_{MN}^B + 1)(\bar{K}_{MN}^B + 2)} \Delta \rho_{MN}^{AB} \quad (1.33)$$

$$\rho_{1:2}^{AB} - \rho_{2:1}^{AB} = \frac{3\bar{K}_{MN}^B}{(2\bar{K}_{MN}^B + 1)(\bar{K}_{MN}^B + 2)} \Delta \rho_{MN}^{AB} \quad (1.34)$$

при $\bar{K}_{MN}^B = 1$

$$\rho_{1:2}^{AB} + \rho_{2:1}^{AB} = 2\rho_{MN}^A - \Delta \rho_{MN}^{AB} = \rho_{MN}^A + \rho_{MN}^B \quad (1.33a)$$

$$\rho_{1:2}^{AB} - \rho_{2:1}^{AB} = \frac{1}{3} \Delta \rho_{MN}^{AB} = \frac{1}{3} (\rho_{MN}^A - \rho_{MN}^B) \quad (1.34a)$$

Анализ приведенных формул показывает, что при $\rho_{MN}^A = \rho_{MN}^B$ (это может наблюдаться в однородной среде, горизонтально-слоистых разрезах, а также при расположении питающей и приемной линий симметрично)

но или параллельно неоднородности) кривые кажущихся сопротивлений прямой и обратной дивергентных установок совпадают между собой и с кривыми КС обычных установок. Этим также подчеркивается отмечавшаяся ранее эффективность применения дивергентных установок именно в горизонтально-неоднородных разрезах. Вполне очевидно также, что точки пересечения кривых двусторонних зондирования обычных и дивергентных установок будут общими.

Как следует из равенства (1.34а), амплитуда расхождения кривых дивергентных установок втрое меньше, чем установок двусторонних зондирования ($A-MN$ и $MN-B$), и это вполне понятно, так как при одностороннем зондировании второй питающий электрод исключается полностью, а применение дивергентных приемных линий только ослабляет его влияние. Сказанное ни в коей мере не противоречит предыдущим выводам о повышенной амплитуде аномалий в разрешающей способности дивергентных установок, так как там речь шла о наблюдениях в скачковом поле (точечного электрода или цепи АВ), а здесь о точечки поля исходных обычных и дивергентных установок различны.

Формула (1.34а) позволяет сделать еще один очень важный вывод: действительно с помощью дивергентных установок в поле симметричной линии АВ можно получать аналоги двусторонних зондирования обычными асимметричными установками. Последние по сравнению с симметричными установками дают более ценную информацию о разрезе, но трудоемки и громоздки из-за необходимости вынесения одного полюса на бесконечность и поэтому неудобные для практического применения, а дивергентные измерения можно выполнять попутно с получением обычных кривых ВЗ.

Установленные соотношения можно использовать также для трансформации теоретических кривых обычных установок над наклонными и горизонтально-вертикальными границами [27]. В кривые КС дивергентных установок, избегая трудоемких, даже с применением ЭВМ, расчетов. Этот способ отчасти использовался нами для получения теоретически кривых дивергентных установок над некоторыми неоднородностями, хотя изученными обычными четырехэлектродными или асимметричными установками.

В целом выполнение в этой главе исследования и анализ свидетельствуют о повышенной дифференциации графиков профилирования и кривых зондирования дивергентными установками, а также о возможности получения с их помощью в поле линии АВ двусторонних кривых, характерных для разрез по обе стороны от пункта наблюдения. Следует

отметить еще одно немаловажное техническое преимущество дивергентных установок перед обычными, состоящее в существенном уменьшении фоновых уровней удаленных помех, которые поступают одновременно на обе полулинии и при измерениях вычитаются. Благодаря этому, кроме упоминавшегося выше разкого уменьшения абсолютных значений погрешностей, при непосредственных измерениях вторых разностей потенциалов сохраняется достаточно высокая и абсолютная точность их регистрации, несмотря на спад абсолютных значений.

Таким образом, наряду с увеличением дифференциации графиков амплитуд аномалий дивергентные установки позволяют получить более точную и качественно новую информацию о разрезе, что является залогом более полной и надежной интерпретации полевых материалов и повышения эффективности электрометрических исследований в целом.

Глава 2

ДИВЕРГЕНТНЫЕ УСТАНОВКИ В ЕСТЕСТВЕННЫХ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ ПОЛЯХ

В естественных электрических полях дивергентные установки применять наиболее просто, так как используется только приемная линия и получаемые величины нужно только привести к единице ее длины.

Применение этих установок в естественных электрических полях является дальнейшим развитием предложенного нами способа непосредственной регистрации вторых производных поля естественной поляризованных тел [21]. Там же, используя характер и особенности теоретических графиков вторых производных, были разработаны основы интерпретации полевых материалов. Целесообразность подобных исследований подтверждается появляющимися в печати сообщениями об использовании высших производных естественных электрических полей как у нас в стране при поисках рудных тел [5], так и за рубежом в целях оконтуривания нефтегазовых месторождений [39].

Использование в естественных электрических полях дивергентных установок, занимающих промежуточное положение между регистрацией градиентов и вторых производных, позволяет в связи с получением двусторонних графиков расширить интерпретационные возможности метода, а также технически удобно, поскольку увеличивается уровень измеренных величин. Последнее обстоятельство позволило нам предложить дивергентные установки и для полей исследования фильтрационного, диффузионно-адсорбционного и коррозионного происхождения.

§ 1. ЕСТЕСТВЕННО ПОЛЯРИЗОВАННЫЕ ТЕЛА

Характерные особенности двусторонних графиков КО дивергентных установок над естественно поляризованными телами выясним на примере простых форм: сферы и бесконечно длинного цилиндра, тонкой пластины, столбчатой и пластообразной залежи. Конечно, полученные графики сохраняют на себе ту идеализацию, которая была допущена при отыскании исходных выражений для потенциала: вмещающая среда однородна и изотропна, а рудные тела также однородны и равномерно поляризованы, что означает линейное изменение по вертикали потенциала на контакте тел с вмещающими породами.

Наклонно поляризованная сфера

Найдем выражения для величин, определяемых с помощью дивергентных установок, воспользовавшись формулой для потенциала погруженно

на некоторую глубину сферы вдоль оси z , проходящей через ее эллипсоид и перпендикулярно к линии пересечения плоскости поляризации с дневной поверхностью [13, 24]:

$$U^G = M \frac{\pi \cos \alpha - h \sin \alpha}{(x^2 + h^2)^{3/2}} \quad (2.1)$$

Здесь

$$M = 2 \frac{E}{\rho} a^3 \frac{J_1}{J_1 + 2J_2} \quad (2.1a)$$

момент диполя, потенциал которого в окружающей среде эквивалентен полю поляризованной сферы; J_1 и J_2 - проводимости сферы и вмещающей среды; E_0 - контактная ЭДС на границе рудного тела с вмещающими породами; h - глубина залегания центра сферы; α - угол наклона плоскости ее поляризации к дневной поверхности.

Учитывая соотношения градиента и второй производной потенциала, регистрируемых дивергентными установками в естественных полях, с величинами $E_{1;2}$ и $E_{2;1}$ (I.10), (I.11) и принимая в качестве исходного потенциал сферы, находим

$$E_{1;2}^G = \frac{M \cos \alpha}{3h^3(\bar{x}^2 + 1)^{3/2}} \left[\pm \frac{2\bar{x}^2 - 3\bar{x} \pm \rho \alpha - 1}{2h} \mp \frac{2\bar{x}^3 - 4\bar{x}^2 \rho \alpha - 3\bar{x} \pm \rho \alpha}{\bar{x}^2 + 1} \right] \quad (2.2)$$

В приведенном выражении, которое для $E_{1;2}^G$ берется с верхним знаком и для $E_{2;1}^G$ - с нижним, $\bar{x} = r/h$ - приведенное расстояние, выражаемое в единицах глубины залегания центра сферы, а остальные величины сохраняют прежние обозначения.

Расчитанные по формуле (2.2) кривые $E_{1;2}^G$ и $E_{2;1}^G$ двусторонних дивергентных установок показаны на рис.2. Хотя аналитическое исследование равенства (2.2) несколько затрудняется в связи с громоздкостью выражений, попытаемся оценить некоторые характерные элементы кривых. Так, в частности, приравняв значения $E_{1;2}^G$ и $E_{2;1}^G$ получаем для определения координат точек пересечения квадратное уравнение

$$2\bar{x}^2 - 3\bar{x} \pm \rho \alpha - 1 = 0, \quad (2.3)$$

совпадающее с равенством для определения нулевых значений градиента потенциала E [21]. Из выражения для корней уравнения (2.3)

$$\bar{x}_{1,2} = \frac{3}{4} \left(\rho \alpha \pm \sqrt{\rho^2 \alpha^2 + \frac{9}{4}} \right), \quad (2.4)$$

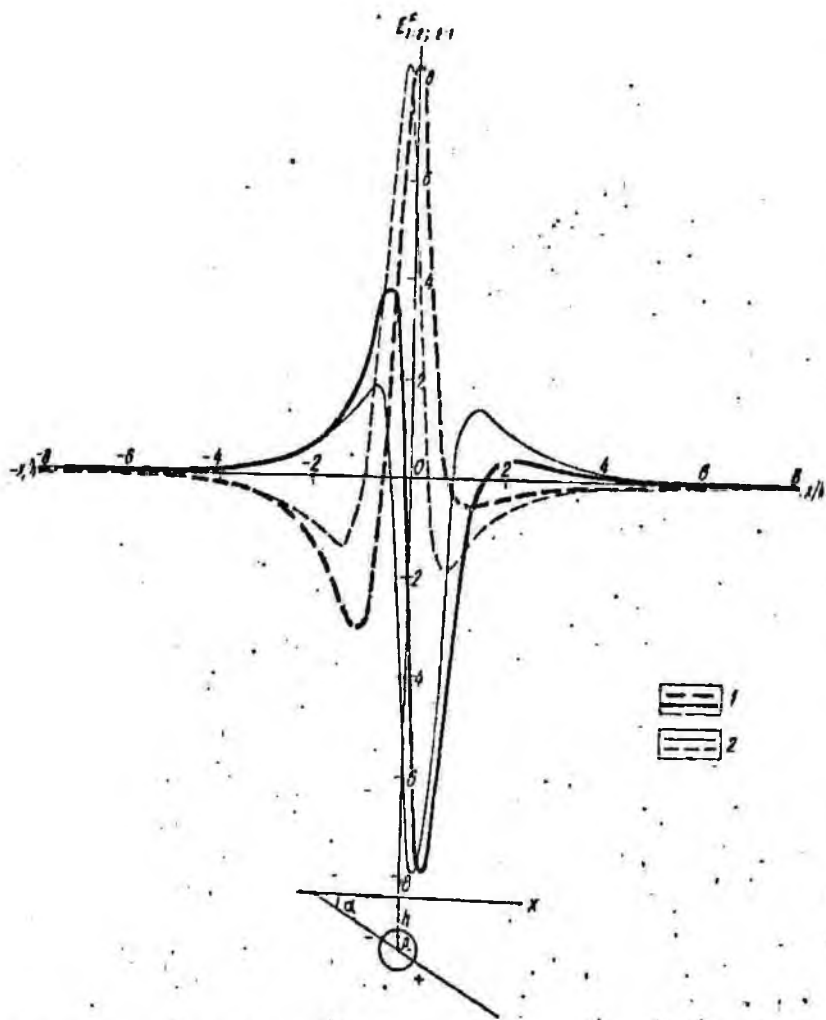


Рис.2. Кривые $E_{1;2;1}^c$ двусторонних дивергентных установок над неклонно и горизонтально поляризованной сферой: 1 - $\alpha = 30^\circ$; 2 - $\alpha = 0^\circ$. $E_{1;2}^c$ - сплошная линия; $E_{2;1}^c$ - штриховая.

легко определить в расстоянии между точками, в которых пересекаются графики,

$$d = x_2 - x_1 = \frac{2h}{2} \sqrt{1g^2 \alpha + \frac{g}{2}}. \quad (2.5)$$

Как видно из рис.2, в этом интервале располагается центр сферы, глубина залегания которого может быть определена из выражения (2.5) при значениях угла наклона от 0 и примерно до 60° . При этих условиях расстояние d изменяется от 1,41 h при $\alpha = 0$ до 2,96 h при $\alpha = 60^\circ$. По мере дальнейшего увеличения угла α верифицируемая точка пересечения графиков двусторонних установок, расположенная примерно над выходом плоскости поляризации на дневную поверхность, постепенно удаляется ($d \rightarrow \infty$), а в предельном случае при $\alpha = 90^\circ$ вовсе исчезает и формула (2.5) теряет смысл, так как правая ее часть превращается в бесконечность.

Из равенства (2.2) и рассчитанных графиков можно также заключить, что кривые $E_{1;2}^c$ и $E_{2;1}^c$ в двух точках пересекают ось x и характеризуются каждая тремя экстремумами: $E_{1;2}^c$ - центральным минимумом и двумя периферийными максимумами, а для $E_{2;1}^c$ знаки anomalies меняются на обратные. Центральные экстремумы, как свидетельствуют теоретические кривые, очень незначительно смещаются в сторону от начала координат, и практически их можно считать совпадающими с центром сферы. При изменении угла α от 0 до 90° кривые деформируются и при вертикальной поляризации, как будет показано ниже, графики E^c прямой и обратной установок становятся зеркальными отражениями друг друга относительно оси y .

Решение обратной задачи по наблюдаемым графикам $\Delta \bar{U}_{1;2}^c = \Delta U_{1;2}^c / R_{1;2} \approx E_{1;2}^c$; $\Delta \bar{U}_{2;1}^c = \Delta U_{2;1}^c / R_{2;1} \approx E_{2;1}^c$ над наклонно поляризованным изометрическим телом, признаком которого могут служить близлежащие минимум и два максимума прямой и максимум с двумя минимумами обратной установок, можно наметить в следующем виде.

1. С карты или кривых $\Delta \bar{U}_{1;2}^c$ и $\Delta \bar{U}_{2;1}^c$ снимаем значения $\Delta \bar{U}_{1;2}^{\text{мин}}$ и $\Delta \bar{U}_{2;1}^{\text{макс}}$ и по их отношению с помощью графика, изображенного на рис.3.1а, определяем угол α .

2. Измерив расстояние d между точками пересечения графиков, можно определить глубину залегания центра сферы h из выражения

$$h = \frac{2d}{3\sqrt{1g^2 \alpha + \frac{g}{2}}}. \quad (2.6)$$

3. Положение центра сферы в плане определяем как среднюю отрезка между $\Delta \bar{U}_{1;2}^{\text{мин}}$ и $\Delta \bar{U}_{2;1}^{\text{макс}}$, или как абсциссу экстремумов, если последние совпадают.

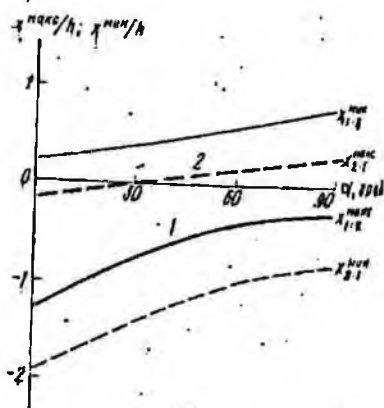
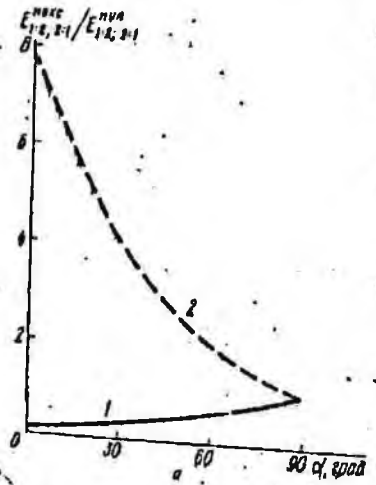
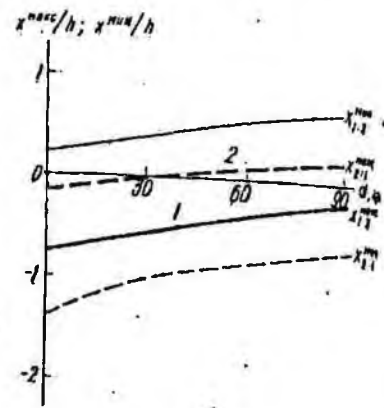
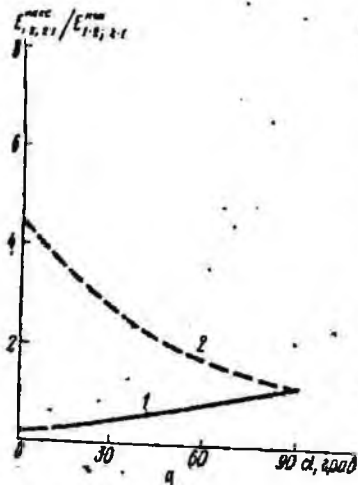


Рис. 3. Зависимость отношения ординат (а) и абсцисс (б) экстремальных дивергентных установок от угла для сферы (I) и цилиндра (II).
 1 - $E_{1:2}^0 / E_{1:2}^0$; 2 - $E_{2:1}^0 / E_{2:1}^0$.

4. Момент поляризованной сферы можно примерно оценить по значению $\Delta U_{1:2}^0$ или $\Delta U_{2:1}^0$ в начале координат, т.е. при $\alpha = 0$. В этом случае

$$\Delta U_{1:2}^0 = \frac{M(\sin \alpha - 2h \cos \alpha)}{6h^4} \quad (2.7)$$

$$M = \frac{6h^4 U_{1:2}^0}{9 \sin \alpha - 2h \cos \alpha} \quad (2.8)$$

5. При наличии сведений для данного района о величинах τ_1 и τ_2 , задаваясь значением контактной ЭДС, из равенства (2.1а) можно примерно оценить величину радиуса сферы a , так как величина E_0 может изменяться в широких пределах — от единиц милливольт до 0,5 - 0,6 В. Для более точных определений требуются специальные уточнения исходных данных [24].

Таким образом, по сравнению с графиками градиента и вторых производных потенциала [21] графики $\Delta U_{1:2:1}$ дивергентных установок могут давать дополнительные сведения о местоположении и характере залегания наклонно поляризованных тел. В связи с условием формы кривых соответственно становятся более громоздкими аналитические выражения для определения координат их характерных точек, зато основные интересные исследователя на практике данные, например местоположение рудного тела, ориентировочные его размеры и глубина залегания, можно определить непосредственно из графиков, не прибегая к расчетам.

Вертикально поляризованная сфера

Вертикально поляризованная сфера является частным случаем наклонно поляризованной при $\alpha = 90^\circ$, однако, учитывая распространенность такой поляризации в реальных условиях, ее стоит рассмотреть отдельно.

Исходное выражение для потенциала в этом случае имеет вид

$$U^0 = -\frac{M}{h^2} \cdot \frac{1}{(z^2 + 1)^{3/2}} \quad (2.9)$$

и соответственно

$$E_{1:2:1}^0 = \frac{M}{2h^4} \cdot \frac{\sqrt{2}zh(z^2 + 1) - 12z^2 + 3}{(z^2 + 1)^{5/2}} \quad (2.10)$$

Как и в предыдущем случае, верхний знак принимается для $E_{1:2}^0$, нижний — для $E_{2:1}^0$.

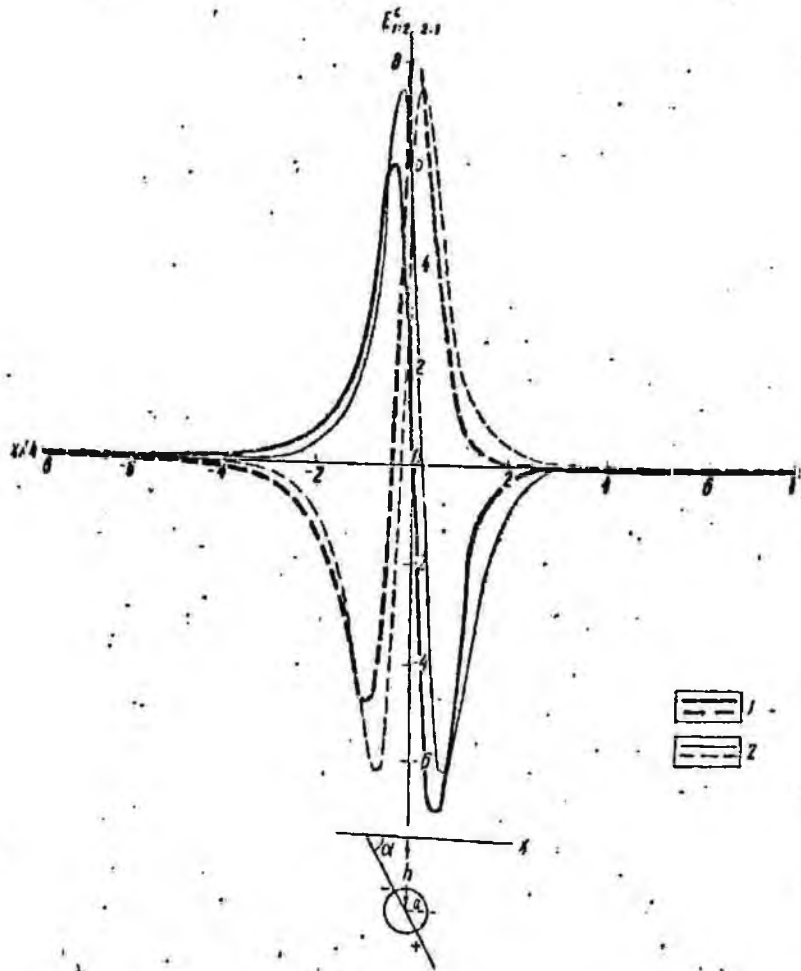


Рис. 4. Кривые $E_{1;2; 2;1}^c$ двусторонних дивергентных установок над наклонно и вертикально поляризованной сферой; 1 - $\alpha = 60^\circ$; 2 - $\alpha = 90^\circ$; $E_{1;2}$ - сплошная линия; $E_{2;1}$ - штриховая

Кривые пересекаются в одной точке при $x = 0$, т.е. над центром сферы, имеют каждый по два экстремума (рис. 4) и представляют собой вертикальные отражения друг друга относительно оси y . Сокращение числа экстремумов (с трех до двух), а также одинаковая их амплитуда для прямой и обратной установок являются отличительными признаками вертикальной поляризации тел. Расстояние между разноименными экстремумами неодинаково и изменяется приблизительно от 0,5 h для максимумов до 1,5 h для минимумов, и любое из них позволяет определить глубину залегания центра сферы h , а второе дает ее контрольное значение.

Используя ординату точки пересечения графиков, можно определить величину M :

$$M = \frac{2h^4 \Delta U_{1;2; 2;1}^{x=0}}{3}, \quad (2.11)$$

а затем, как и в предыдущем случае, можно оценить и величину радиуса сферы a .

Таким образом, в случае вертикальной поляризации обратная задача решается достаточно легко и просто. Заметим, что приведенный способ решения является далеко не единственным и, в принципе, благодаря обилию характерных элементов на кривых возможны и другие варианты.

Наклонно поляризованный цилиндр

Потенциал поля наклонно поляризованного цилиндра на дневной поверхности определяется [13, 24] выражением

$$U^4 = M \frac{x \cos \alpha - h \sin \alpha}{x^2 + h^2}, \quad (2.12)$$

$$M = 2F_0 a \frac{J_1}{J_1 + J_0}, \quad (2.13)$$

где через это выражение обозначен момент линейного диполя, эквивалентного по своему полю в окружающей среде поляризованному цилиндру, a - радиус цилиндра, h - глубина залегания его оси. Остальные обозначения такие же, как и для сферы.

Используя выражения $E_{1;2}$ и $E_{2;1}$ для предельных дивергентных установок через напряженность и вторую производную поля (1.10), (1.11), а также значения последних [21], можно записать

$$E_{1;2; 2;1}^4 = \frac{M \cos \alpha}{3h^2(a^2+1)^2} \left[\pm (\alpha^2 - 2\alpha \operatorname{tg} \alpha - 1) + \frac{3}{h} \frac{x^2 - 3x^2 \operatorname{tg} \alpha - 3x + \operatorname{tg} \alpha}{(x^2+1)} \right], \quad (2.14)$$

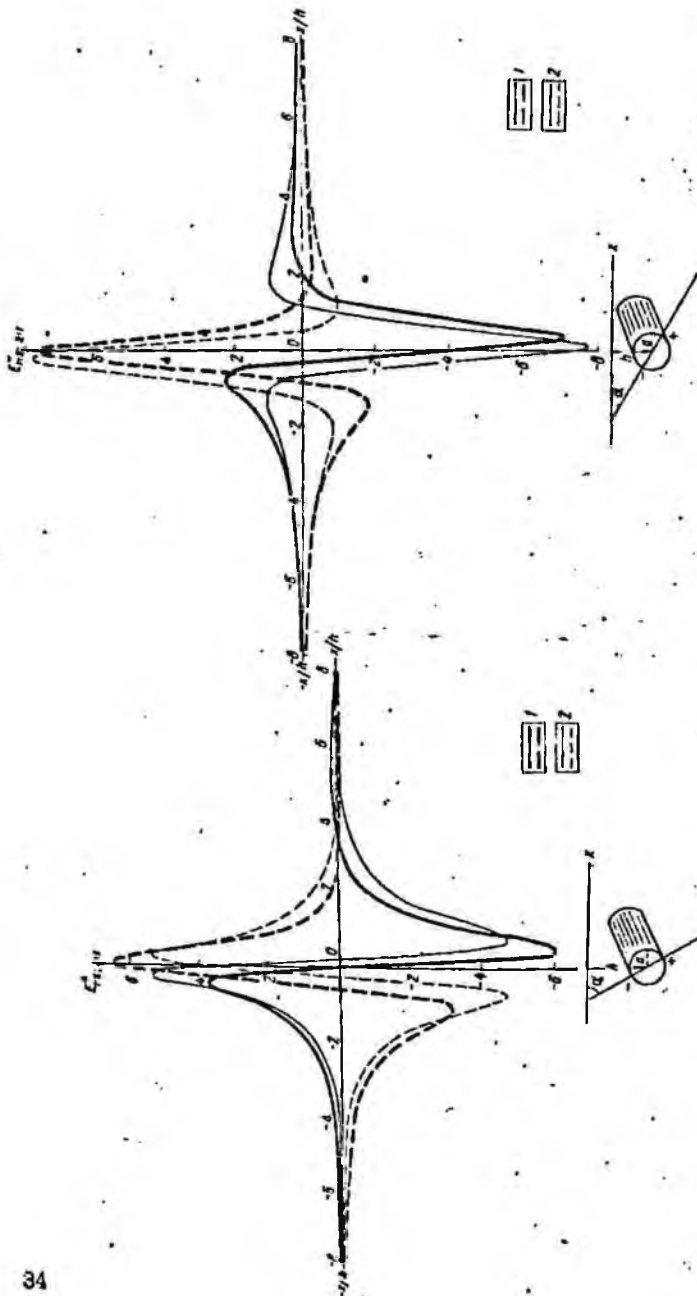


Рис. 5. Кривые $E_{1:2}^4$ и $E_{2:1}^4$ дивергентных установок над наклонно и горизонтально поляризованным цилиндром. $\alpha = 30^\circ$; 2 - $\alpha = 0^\circ$; $E_{1:2}^4$ - сплошная линия.

Рис. 6. Кривые $E_{1:2}^4$ и $E_{2:1}^4$ дивергентных установок над наклонно и вертикально поляризованным цилиндром. $\alpha = 0^\circ$; 2 - $\alpha = 30^\circ$; $E_{1:2}^4$ - сплошная линия.

где по-прежнему для прямой установки принимается верхний знак (плюс). Рассчитанные по этой формуле кривые приведены на рис. 5, 6. Абсциссы точек пересечения кривых определятся из равенства $\bar{x}^2 - 2\bar{x}tg\alpha - 1 = 0$ и составят $\bar{x}_{0,1} = \frac{\sin\alpha \pm 1}{\cos\alpha}$, а расстояние между ними $d = 2h \sec\alpha$.

Для решения обратной задачи нам еще может понадобиться значение $E_{1:2}^4$ в начале координат.

$$E_{1:2}^{x=0} = \frac{M(h \cos\alpha - 3 \sin\alpha)}{3h^3} \quad (2.15)$$

Обратную задачу над наклонно поляризованным цилиндром по заданным кривым $\Delta U_{1:2, 2:1}^4 = \frac{\Delta U_{1:2, 2:1}}{h_{1:0}}$ дивергентных установок можно решать следующим образом.

1. Сняв с графика или карты значения $\Delta \bar{U}_{2:1}^{макс}$ и $\Delta \bar{U}_{1:2}^{мин}$ по их отношению с помощью кривой рис. 3, определяем величину угла α .

2. По найденному значению α и расстоянию между точками пересечения кривых ΔU^4 прямой и обратной установок d определим глубину залегания оси цилиндра

$$h = \frac{d}{2 \sec\alpha} \quad (2.16)$$

3. Положение оси цилиндра в плане совпадает примерно с серединой отрезка между центральными экстремумами, а если последние совпадают по вертикали, - то с их абсциссой.

4. По значению кривой $\Delta U_{1:2}^{x=0}$ в начале координат, используя соотношение (2.15), находим

$$M = \frac{3h^3 \Delta U_{1:2}^{x=0}}{h \cos\alpha - 3 \sin\alpha} \quad (2.15a)$$

5. Оцениваем величину диаметра цилиндра при известных T_1, T_0 и, задавшись значением E_0 , из равенства (2.13).

Вертикально поляризованный цилиндр

Формулы для расчета кривых $E_{1:2}^4$ и $E_{2:1}^4$ дивергентных установок над вертикально поляризованным цилиндром получим, полагая в равенстве (2.14) $\alpha = \frac{\pi}{2}$.

$$E_{1:2;2:1}^4 = \frac{M[3(3\bar{x}^2-1)+2h\bar{x}(\bar{x}^2+1)]}{3h^3(\bar{x}^2+1)^3} \quad (2.17)$$

Приравняв $E_{1:2}^4$ и $E_{2:1}^4$, легко убедиться, что графики пересекутся над центром цилиндра, т.е. при $x = 0$ (рис.6).

Глубину залегания оси цилиндра можно определить как 0,8 отрезка между точкой пересечения графиков и минимумом любого из них. Зная h , по ординате точки пересечения можно найти

$$M = \frac{3h^3 \Delta \bar{U}_{1:2}}{3} = h^3 \Delta \bar{U}_{1:2} \quad (2.18)$$

и затем, пользуясь соотношением (2.13), и радиус цилиндра a .

Вертикально поляризованный тонкий пласт

Исходное выражение потенциала над вертикально поляризованным пластом бесконечной длины вдоль оси, перпендикулярной к его поверхности, имеет вид

$$U^m = \lambda \pi \frac{x^2 + h^2}{x^2 + H^2} \quad (2.19)$$

где λ - линейная плотность зарядов на нитях, совпадающих с верхней и нижней кромками тела и эквивалентных по своему влиянию полю вертикально поляризованного пласта, а h и H - глубины залегания его верхней и нижней границ соответственно. Формулы для расчета кривых E предельных дивергентных установок будут иметь вид

$$E_{1:2;2:1}^m = \frac{2\lambda(1-\bar{H}^2)}{h^2(\bar{x}^2+1)(\bar{x}^2+3\bar{H}^2)} \left[\pm h\bar{x} + \frac{\sqrt{h^2 + (1+\bar{H}^2)(\bar{x}^2-H^2)}}{2(\bar{x}^2+1)(\bar{x}^2+\bar{H}^2)} \right] \quad (2.20)$$

где $\bar{x} = \frac{x}{h}$; $\bar{H} = \frac{H}{h}$ - приведенные расстояния и глубины до подошвы пласта, выраженные в единицах глубины залегания его верхней кромки.

Вполне очевидно, что над вертикально поляризованным пластом кривые $E_{1:2}^m$ и $E_{2:1}^m$ также пересекаются над его центром (рис.7). По характеру они сходны с одноименными кривыми над вертикально поляризованным цилиндром и отличаются только более пологим спадом к нулю при больших значениях в связи с увеличением расстояния между заряженными нитями и превращением линейного диполя в систему двух линейных проводников.

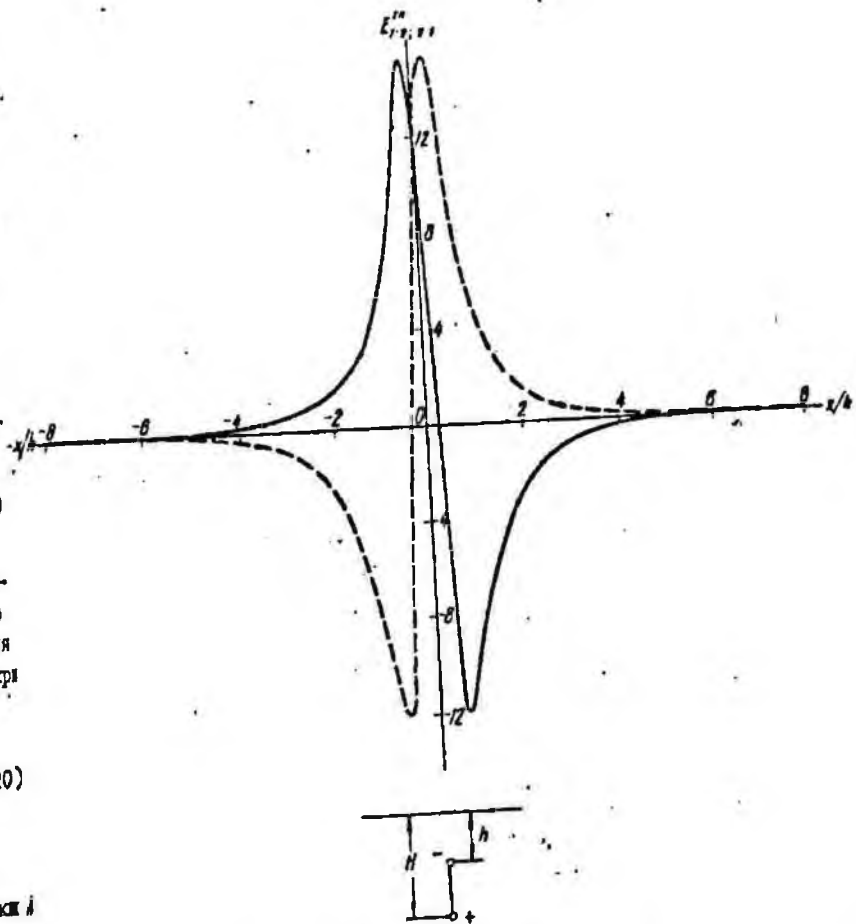


рис.7. Кривые $E_{1:2;2:1}^m$ дивергентных установок над вертикально поляризованным тонким пластом: $E_{1:2}^m$ - сплошная линия, $E_{2:1}^m$ - штриховая.

Аналитически установить абсциссы экстремальных точек трудно, но приближенно их смещение от начала координат можно оценить как 0,67 \bar{h} для максимумов и 1,56 \bar{h} - для минимумов.

Таким образом, по кривым $\Delta U_{1:2; 2:1}^{CS}$ дивергентных установок над вертикально поляризованным тонким пластом достаточно уверенно определяется его плановое положение, а по расстояниям экстремумов от центра можно установить примерно соотношение глубин залегания верхних и нижних границ пласта.

Вертикальная столбообразная залежь

Столбообразную залежь для расчетов создаваемого во внешней среде поля обычно аппроксимируют точечным отрицательным электродом в головке залежи и линейным положительным равномерным зарядом, сопадающим с осью залежи (рис. 8). Суммарный потенциал, создаваемый такой системой на дневной поверхности, определяется [24] выражением

$$U^{CS} = -\frac{I\rho}{2\pi\epsilon_0} \ln \left(\frac{1}{2L} \frac{x+L+R_{MA}}{x-L+R_{MB}} - \frac{1}{R_{MB}} \right), \quad (2.2)$$

где $R_{MB} = \sqrt{x^2 + (x-l)^2}$ и $R_{MA} = \sqrt{x^2 + (x+l)^2}$ - расстояния от пункта наблюдения M до верхней и нижней кромок залежи, обозначенных в соответствии с их полярностью буквами B и A ; ρ_0 - удельное сопротивление вмещающих пород; I - суммарный ток, создаваемый точечным и линейным электродами; x и x - координаты точек наблюдения относительно эпипцентра точечного источника; l - половина длины столбообразной залежи.

По аналогии с предыдущими телами найдем выражения для $E_{1:2}^{CS}$ и $E_{2:1}^{CS}$

$$E_{1:2; 2:1}^{CS} = \frac{I\rho}{6\epsilon_0} \left[\frac{1}{2lR_{MA}(x+l+R_{MA})} + \frac{1}{R_{MB}2l(x-l+R_{MB})} + \frac{1}{(R_{MB})^3} \right] + \frac{3}{2} \left[\frac{R_{MA}^2(x+l+R_{MA}) - x^2(x+l+2R_{MA})}{2lR_{MA}^3(x+l+R_{MA})^2} - \frac{R_{MB}^2(x-l+R_{MA}) - x^2(x-l+2R_{MA})}{2lR_{MB}^3(x-l+R_{MB})^2} \right] + \frac{(R_{MB})^2 - 3x^2}{(R_{MB})^3} \quad (2.2)$$

Полученная формула громоздкая и не совсем удобная для аналитического исследования, тем не менее по ее виду также легко заключить, что кривые $E_{1:2}^{CS}$ и $E_{2:1}^{CS}$ пересекаются в начале координат, т.е. при $x = 0$. Это подтверждается и рассчитанными графиками $E_{1:2}^{CS}$ и $E_{2:1}^{CS}$, показанными на рис. 8. Качественно характер их такой, как и для пре-

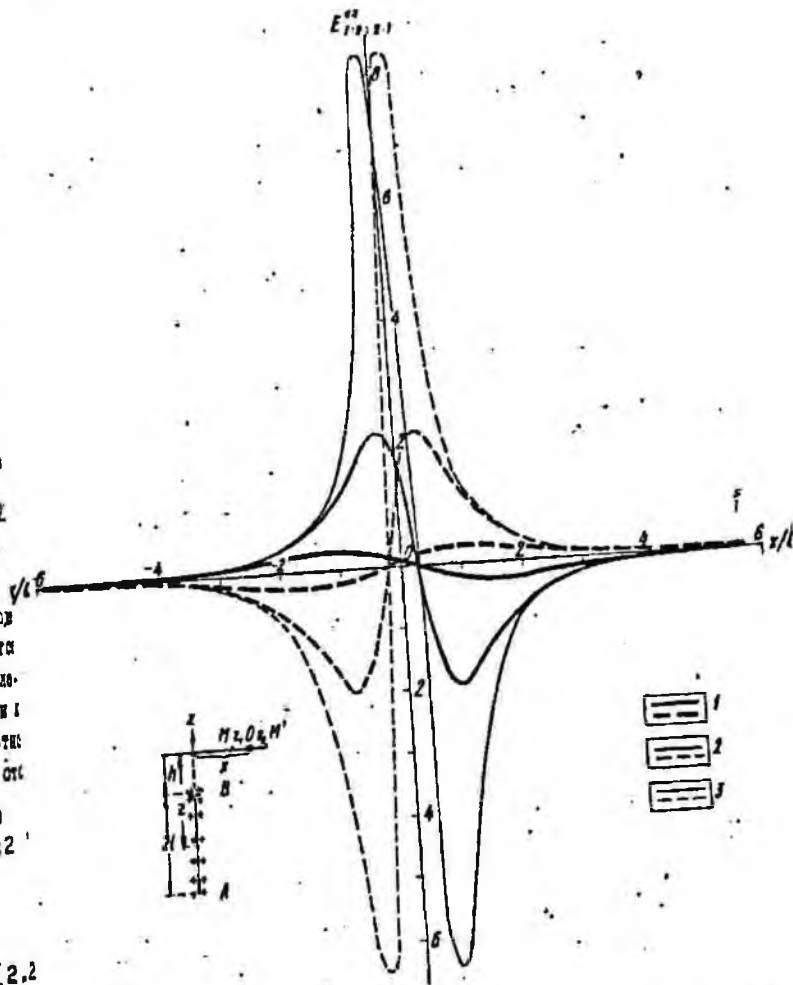


рис. 8. Кривые $E_{1:2; 2:1}^{CS}$ дивергентных установок над вертикальной столбообразной залежью: 1 - $h/2l = 2,2$; 2 - $h/2l = 0,5$; 3 - $h/2l = 0,3$; $E_{1:2}^{CS}$ - сплошная линия, $E_{2:1}^{CS}$ - штриховая.

двух тел и отличается от них только крутизной. Пределы изменения глубины залегания верхней кромки залежи можно оценить по разности между экстремумами. Полагая, что $2l \ll h$ и столбообразная залежь превращается в диполь, способами, разработанными для сфер, можно оценить максимальное значение глубины залегания головы h и при $2l \gg h$ и превращении залежи в точечный электрод - минимальное значение.

Вертикальная пластообразная залежь

По аналогии со столбообразным телом тонкую пластообразную залежь в первом приближении можно аппроксимировать полем линейного отрицательного источника, витанутого вдоль верхней кромки пластины и положительно равномерно заряженной пластины, расположенной в плоскости пласта и совпадающей с его контурами. Поле такой системы дневной поверхности для вертикального пласта прямоугольной формы обозначаемого в соответствии с полярностью буквами ВВ', АА', ББ', имеет вид [24]

$$U^{ns} = \frac{I\rho}{2\pi 2\delta} \left[\frac{1}{2L} \left[(L-x) \ln \frac{y+\delta+R_{MB}}{y-\delta+R_{MB}} + (L+x) \ln \frac{y+\delta+R_{MA}}{y-\delta+R_{MA}} + \right. \right. \\ \left. \left. + (y+\delta) \ln \frac{x+L+R_{MA}}{x-L+R_{MA}} - (y-\delta) \ln \frac{x+L+R_{MB}}{x-L+R_{MB}} - x \left(\operatorname{arctg} \frac{(y+\delta)(L+x)}{xR_{MA}} + \right. \right. \right. \\ \left. \left. + \operatorname{arctg} \frac{(y-\delta)(L-x)}{xR_{MB}} - \operatorname{arctg} \frac{(y+\delta)(L+x)}{xR_{MA}} - x \left(\operatorname{arctg} \frac{(y+\delta)(L-x)}{xR_{MB}} \right) \right] - \right. \\ \left. - \int \pi \frac{y+\delta+R_{MA}}{y-\delta+R_{MB}} \right],$$

$$R_{MB} = \sqrt{x^2 + (y+\delta)^2 + (x-L)^2}; \quad R_{MA} = \sqrt{x^2 + (y-\delta)^2 + (x-L)^2};$$

$$R_{MB} = \sqrt{x^2 + (y+\delta)^2 + (x+L)^2}; \quad R_{MA} = \sqrt{x^2 + (y-\delta)^2 + (x+L)^2}.$$

Предельный вид кривых дивергентных установок по этой формуле определяется в связи с громоздкостью выражений, а рассчитывалось графиками потенциалов, из которого затем находились в каждой точке значения кривых дивергентных установок по формулам

$$\Delta U_{1,2}^{ns} = \frac{1}{3} (2U_{1,2}^{ns} + U_{1,1}^{ns} - 3U_0^{ns}) \dots$$

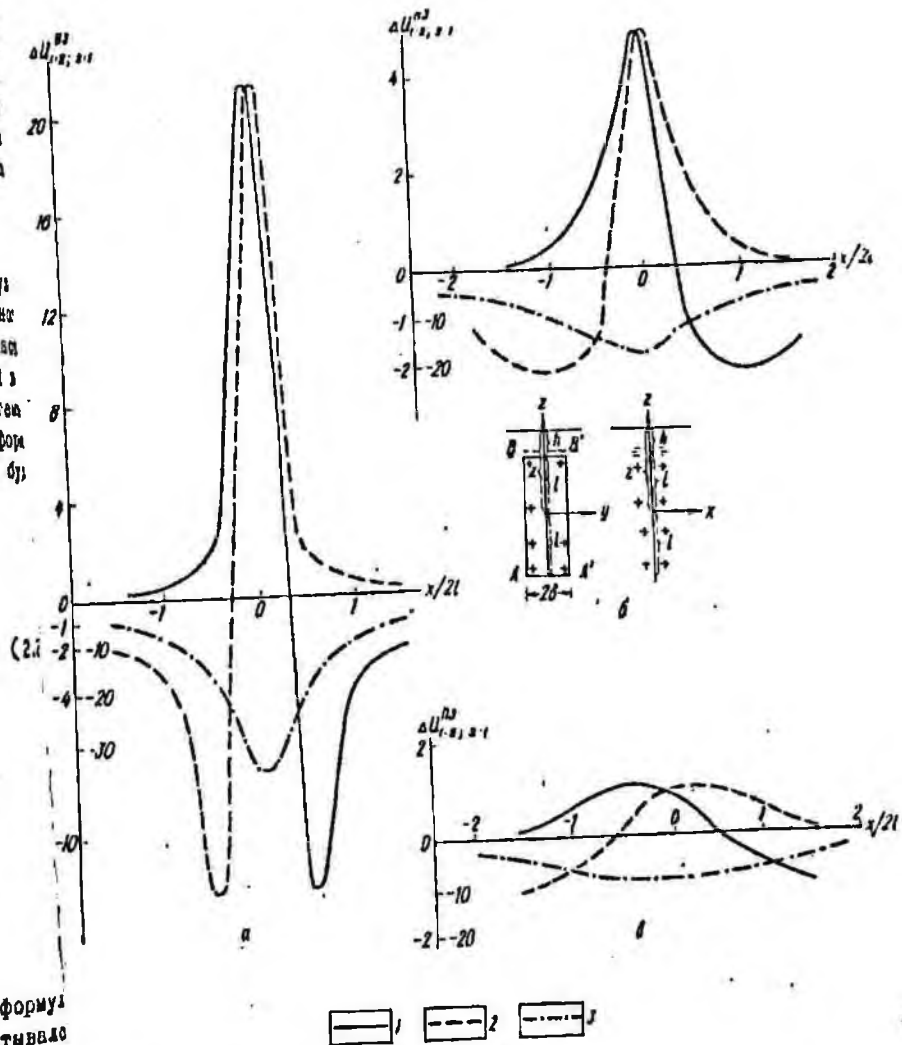


Рис. 9. Кривые $\Delta U_{1,2}^{ns}$ дивергентных установок над вертикальной пластообразной залежью; а - $h/2l = 0,3$; б - $h/2l = 0,5$; в - $h/2l = 1,1$; 1 - $\Delta U_{1,2}^{ns}$; 2 - $\Delta U_{1,1}^{ns}$; 3 - U_0^{ns} .

$$\Delta U_{2,1}^{NS} = \frac{1}{3} (U_{-1}^{NS} + 2U_{+1}^{NS} - 3U_0^{NS}) \dots,$$

(2.2)

где U_0^{NS} , U_{-1}^{NS} и U_{+1}^{NS} - значения потенциала в центральной, предыдущей и последующей точках соответственно.

Как видно из рис. 9, характер полученных таким способом кривых для столбчатой заделки, а крутизна становится еще меньше. Положение заделки и здесь фиксируется достаточно надежно точкой пересечения кривых, а расстояние между экстремумами позволяет определить возможные пределы изменения глубины залегания верхней кромки. По аналогии с предыдущим телом при $2l \ll h$ пластинчатая заделка превращается в линейный диполь конечной длины, и максимальную глубину залегания верхней кромки можно оценить по формулам для вертикально поляризованного цилиндра, а при $2l \gg h$ - минимальные значения h по формулам для ограниченного линейного проводника, которые будут рассмотрены в следующей главе.

Комплекс естественно поляризованных тел

Наряду с рассматривавшимися выше одиночными телами особняком для практики представляют сложные аномалии, вызванные двумя или несколькими близлежащими естественно поляризованными телами. Такие аномалии постоянно привлекали внимание исследователей и неоднократно рассматривались в специальной литературе [24, 26]. Исследования сложных аномалий, преимущественно наблюдающихся в реальных условиях, необходимо в первую очередь для разработки критериев распознавания и установления отличий кривых над ними от кривых над одиночными телами, а затем для создания основ качественной и количественной интерпретации таких аномалий. В связи с этим целесообразно рассмотреть вкратце характерные особенности в сложных поляризованных телами, по характеру все графики похожи, но различаются лишь интенсивностью и размерами. Учитывая указанные особенности, постараемся объяснить главные характерные черты сложных аномалий на примере более простых представителей изометрических и вытянутых тел, а именно двух вертикально поляризованных сфер и наклонно поляризованных цилиндров. Комплекса, состоящего из двух тел, для установ-

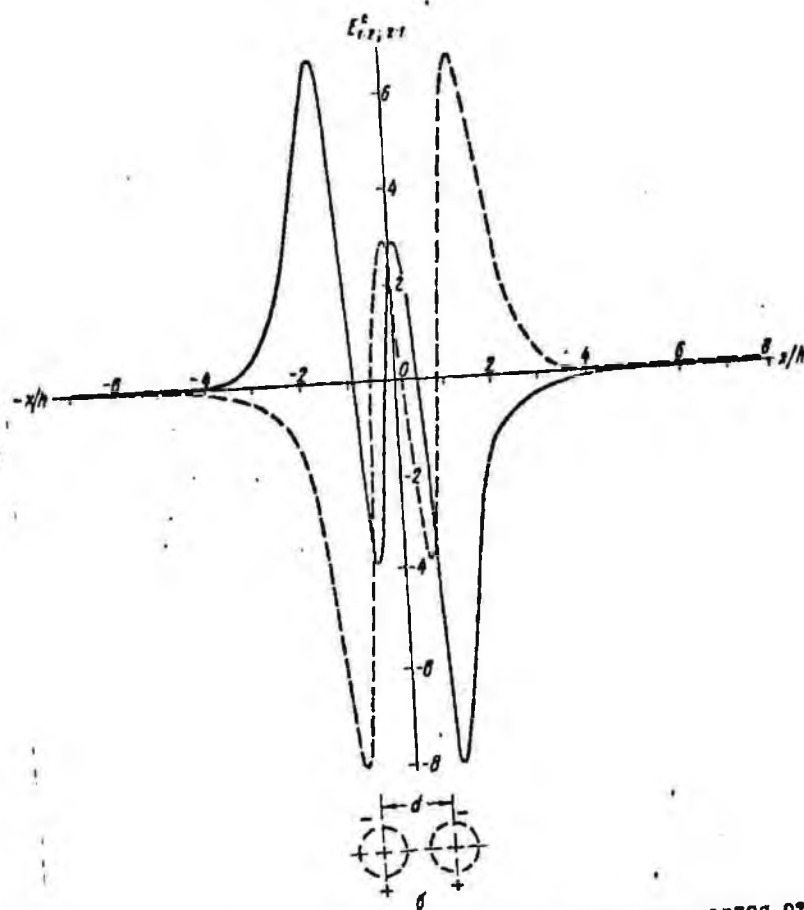
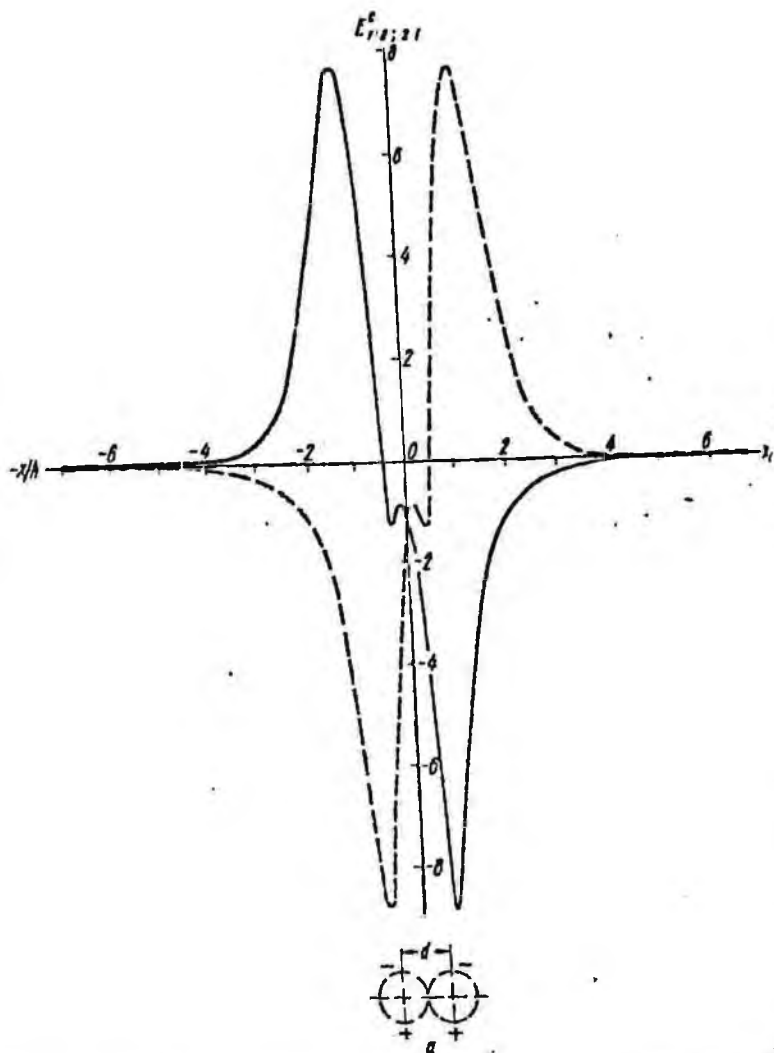
ления принципиальных особенностей сложных кривых, на наш взгляд, достаточно, ибо увеличение количества источников, как правило, ведет лишь к повторению уже встречающихся элементов и принципиально не дает существенно новой информации.

В литературе имеется строгое решение задачи для поля двух одинаковых вертикально поляризованных идеально проводящих сфер с учетом их взаимного влияния, полученное методом последовательных зеркальных отражений [26]. Однако эти выражения являются громоздкими для расчетов и тем более математического анализа, поэтому возникла необходимость в разработке приемов, обеспечивающих достаточную точность и простоту получения кривых $E_{1;2}^C$; $E_{2;1}^C$ над комплексом тел, сохраняя основные особенности их конфигурации. Как показали выполненные расчеты [26], при расстоянии между сферами, достаточном превышающем их радиус ($h \gg 2a$), и глубине залегания больших двух радиусов ($h \gg 2a$) взаимным влиянием сфер для приближенных расчетов можно пренебречь и представить сложную аномалию в виде суммы полей одиночных тел без учета их взаимного влияния.

Пользуясь принципом суперпозиции, мы нашли поля над двумя идентичными вертикально поляризованными сферами и наклонно поляризованными цилиндрами, залегающими на глубине h , при различном удалении их центров на расстоянии $d/h = 1; 1,5$ и 2 (рис. 10, 11). Для удобства сопоставления центров поляризованных тел с фиксирующими их характерными пересечениями на кривых $E_{1;2}^C$; $E_{2;1}^C$ последние развернуты вокруг горизонтальной оси на 180° , что равносильно изменению знака исходной кривой потенциала или замене минимума над телом на максимум.

Из анализа кривых $E_{1;2}^C$ и $E_{2;1}^C$ над комплексом двух вертикально поляризованных сфер (рис. 10) следует, что при $d/h = 1$ на кривых прямых ($E_{1;2}^C$) и обратных ($E_{2;1}^C$) дивергентных установок в их центре являются слабые перегибы, которые при $d/h = 1,5$ перерастают в достаточно отчетливые "внутренние" аномалии, достигающие с увеличением расстояния между телами до $d/h = 2$ почти амплитуд основных, внешние экстремумов. Характерно, что, как и для одиночных тел, местоположение центров сфер, а также сложной аномалии в целом фиксируется весьма отчетливым пересечением кривых $E_{1;2}^C$ и $E_{2;1}^C$ прямых и обратных установок. Вполне очевидно, что по мере удаления сфер друг от друга они будут проявляться обособленными аномалиями, характерными для одиночных тел.

Подобный ход кривых $E_{1;2}^C$ и $E_{2;1}^C$ наблюдается над комплексом двух наклонно поляризованных цилиндров (рис. 11). При расстояниях



между последними, равных глубине их залегания, на графиках $E_{1:2}^{II}$ и $E_{2:1}^{II}$ отмечается незначительный перегиб, амплитуда которого растает по мере удаления тел друг от друга, и при $d/h = 2$ уже четко фиксируется каждый из цилиндров в отдельности. Положение осей последних и середина расстояния между ними также четко отмечаются двумя боковыми и центральным пересечениями кривых $E_{1:2}^{II}$ и $E_{2:1}^{II}$ прямых и обратных установок. При этом в связи с наклоном

оризации цилиндров все пересечения незначительно смещаются от эпицентров тел в сторону падения плоскости поляризации.

Сопоставляя кривые над комплексом возмущенных тел, характеризующихся меньшей протяженностью, можно заключить, что, например, тонкие вытяженные пластины будут расчленяться несколько хуже, чем цилиндры, а вытяженные наклонные, но ограниченные по пространству столбо- и пластинчатые заготовки будут занимать промежуточное положение между сферами и цилиндрами.

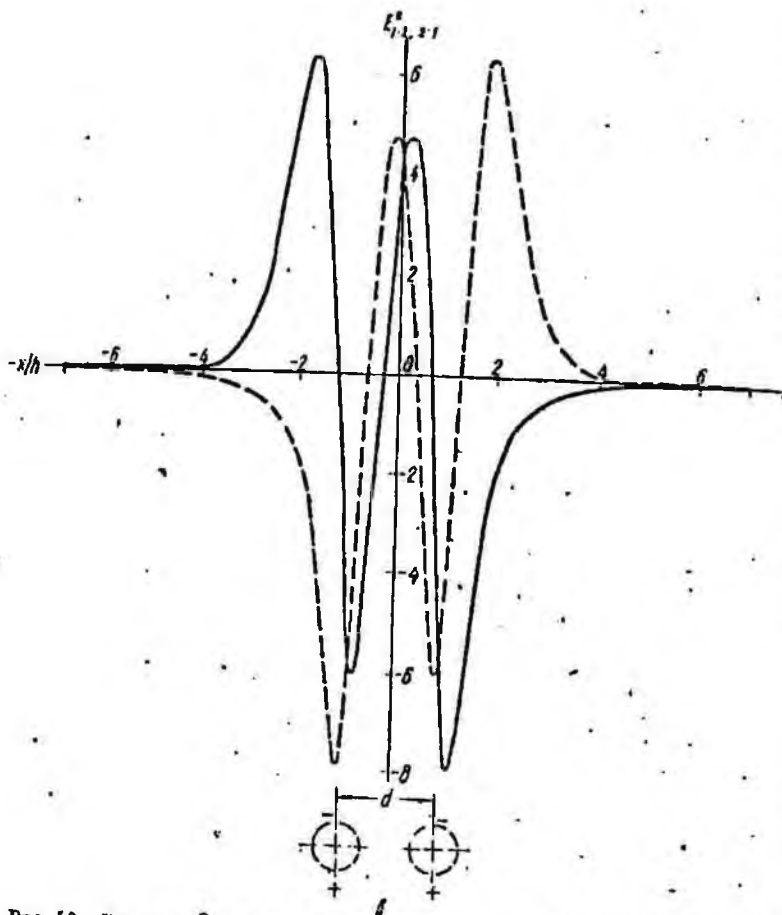


Рис. 10. Кривые $E_{1:2}^C$, $E_{2:1}^C$ дивергентных установок над двумя вертикально поляризованными сферами: а - $d/h = 1$; б - $d/h = 1,5$; в - $d/h = 2$; $E_{1:2}^C$ - сплошная линия; $E_{2:1}^C$ - штриховая.

Таким образом, проанализировав полученные кривые $E_{1:2}$ и $E_{2:1}$ можно сделать вывод, что при расстояниях между естественно поляризуемыми телами, превышающими глубины их залегания, по кривым $E_{1:2}$ и $E_{2:1}$ дивергентных установок можно распознать сложную аномалию на замещающие объекты и примерно установить местоположение тел по характерным пересечениям кривых.

Сравнение полученных данных с результатами исследований кривых потенциала, градиента и второй производной над подобным комплексом

естественно поляризованных тел [21] подтверждает сделанный ранее вывод о том, что по разрешающей способности графики дивергентных установок занимает промежуточное положение между кривыми градиента и второй производной потенциала и заметно уступает последней. Так, в частности, расчленение сложной аномалии на составляющие ее объекты на графиках E' начинается при расстояниях между телами примерно вдвое меньших глубины их залегания.

Тем не менее двусторонние дивергентные установки имеют определенные преимущества при решении одной из основных задач - установлении местоположения искомого объекта. Последние как в простых, так и в сложных аномалиях фиксируются четким пересечением кривых $E_{1:2}^C$ и $E_{2:1}^C$, которое подобно пересечению произвольных графиков, например комбинационного профилирования, является в реальной геологической обстановке надежным критерием обнаружения неоднородности.

Нет сомнения в том, что более информативный исходный материал в виде кривых двусторонних дивергентных установок позволит в будущем по мере накопления фактического материала и углубления тематических расчетов подойти и к более уверенным количественным определениям, теоретические основы которых пока разработаны эмпирически и главным образом для одиночных тел простых форм.

§ 2. ПОЛЯ ФИЛЬТРАЦИОННОГО ПРОИСХОЖДЕНИЯ

Естественное электрическое поле, возникающее при фильтрации унтовых вод в проницаемые породы, заменяет полем простого слоя, впадающего с поверхностью, сквозь которую происходит фильтрация. Соответственно с этим выражение для поля (потенциала) фильтрации простирания пласта [10] будет иметь вид

$$U^{\varphi} = -\frac{e^{\varphi} h_0}{2\pi} \left[\bar{x}_1 \ln(1 + \bar{x}_1^2) - \bar{x}_2 \ln(1 + \bar{x}_2^2) + 2(\arctg \bar{x}_1 - \arctg \bar{x}_2) \right], \quad (2.26)$$

$$\bar{x}_1 = \frac{2x + \delta}{2h_0};$$

$$\bar{x}_2 = \frac{2x - \delta}{2h_0};$$

- координата точки наблюдения, отсчитываемая от центра пласта; δ и δ' - мощность наносов и пласта соответственно; e^{φ} и E^{φ} - применение и разность потенциалов фильтрации, связанные соотношением

$$e^{\varphi} = \frac{E^{\varphi}}{l} = \frac{2\gamma \rho}{4\pi \mu} \frac{\rho}{l},$$

в котором ϵ, ρ и μ - диэлектрическая проницаемость, удельное электрическое сопротивление и вязкость фильтрующейся жидкости; l - разность потенциалов между движущейся и неподвижной обкладками двойного

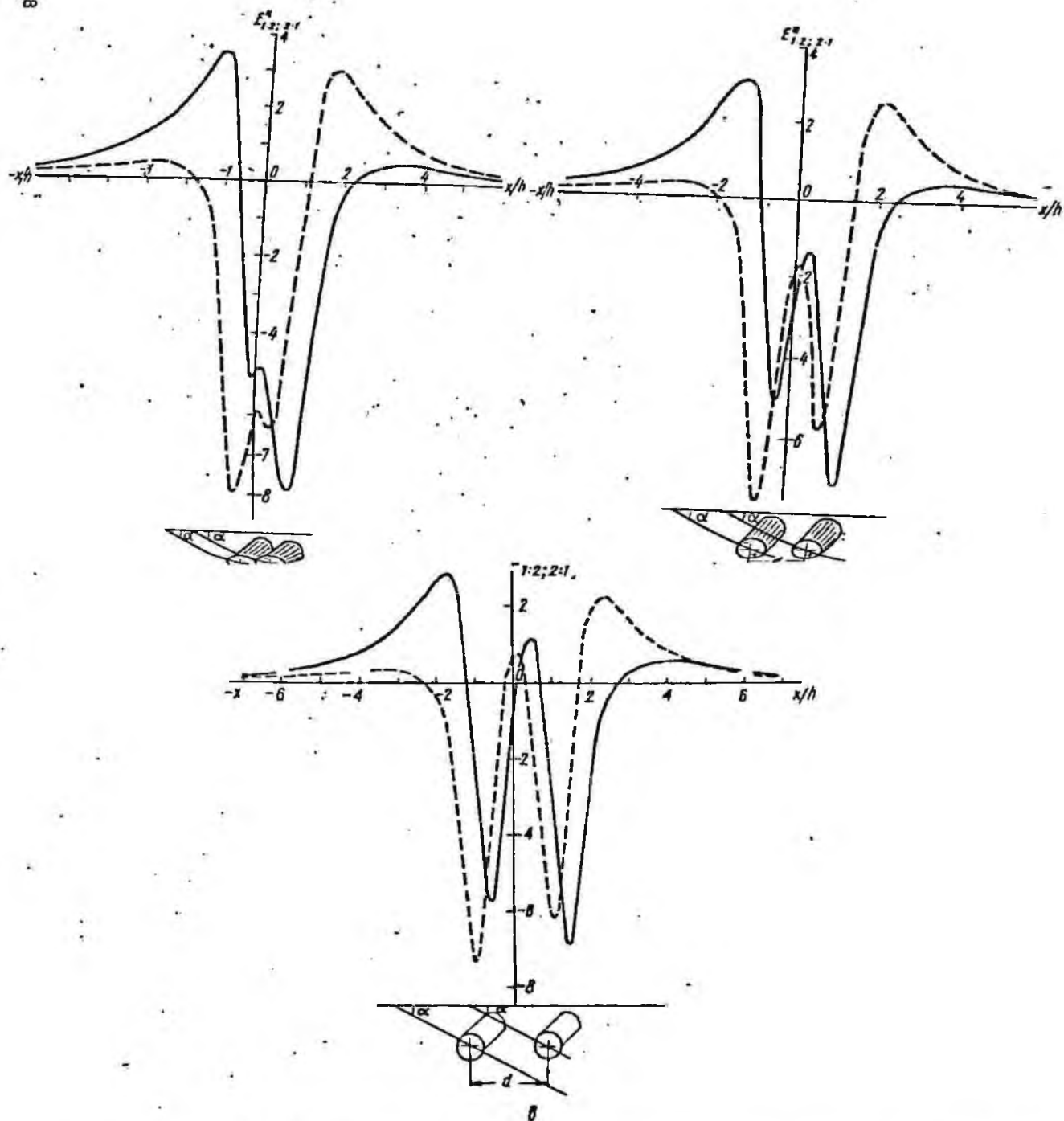


Рис.11 Кривые $E_{1,2}^{(2)}$ дивергентных установок над двумя наклонно поляризованными цилиндрами: а - $d/h=1$; б - $d/h=1,5$; в - $d/h=2$.

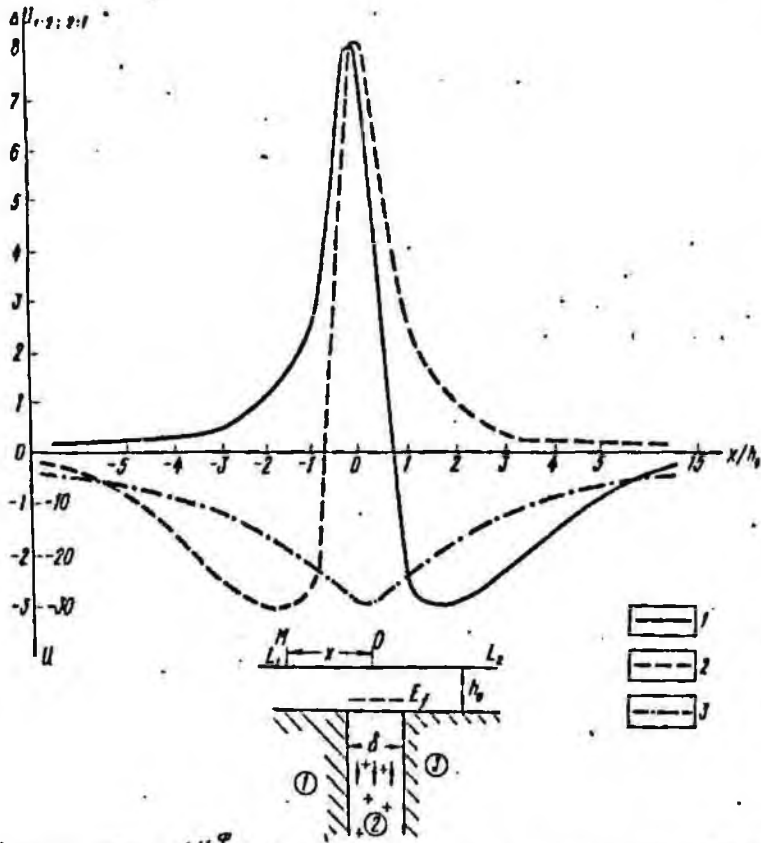


Рис.12. Кривые $\Delta U_{r,2; z,1}^{\varphi}$ дивергентных установок в естественном фильтрационном происхождении: 1 - $\Delta U_{r,2}^{\varphi}$; 2 - $\Delta U_{z,1}^{\varphi}$; 3 - U

го электрического слоя; ρ - разность давлений, под действием которой происходит фильтрация на пути l .

Кривые $\Delta U_{r,2; z,1}^{\varphi}$ дивергентных установок при фильтрации грунтовых вод через пласт, рассчитанные по аналогии с пластобразной моделью конечного-разностным способом, показаны на рис.12. Они характеризуются четким пересечением над центром пласта и довольно выразительными экстремумами по обе стороны от него. Аналитическое исследование их координат затруднено, однако из рисунка видно, что расстояние между ними по оси x прямо пропорционально ширине пласта и мощности перекрывающих его наносов. Сам пласт находится внутри интервала между минимумами и несколько меньше его по ширине.

§ 3. ЮЛЯ ДИФФУЗИОННО-АДСОРБЦИОННОГО ПРОИСХОЖДЕНИЯ

В качестве исходных формул для потенциала диффузионно-адсорбционного происхождения воспользуемся решением для случая пористого (лещанного) вертикального пласта мощностью δ , залегающего в одной толще тонкодисперсных пород (глин) и перекрытого наносами мощностью h_0 [10].

Потенциал, возникающий в результате процессов диффузии растворенных в воде солей и образования двойных электрических слоев отрицательных во внешней среде над пластом и положительных над вмещающими породами) при условии, что вследствие одинаковой минерализации вод, насыщающих пласт и вмещающие породы, контактные разности потенциалов на границе между ними отсутствуют (рис.13,а), определяется следующим выражением [10]:

$$U^A = E_1 - \frac{\alpha_1 - \alpha_2}{x} (E_1 - E_2) E_2 - \frac{\operatorname{arctg} h_1 - \operatorname{arctg} h_2}{x} (E_1 + E_2), \quad (2.27)$$

где E_1 и E_2 - контактные разности потенциалов на границе наносов и вмещающими породами и пластом соответственно; α_1 и α_2 - углы, образованные с дневной поверхностью плоскостями, проходящими через верхние границы пласта и точку наблюдения M ; плоскости являются теньями телесного угла, под которым поверхность пласта видна из точки M ; $h_1 = \frac{h_0}{x - \frac{\delta}{2}}$; $h_2 = \frac{h_0}{x + \frac{\delta}{2}}$; x - расстояние точки наблюдения от центра пласта; h_0 - мощность наносов, δ - ширина пласта.

Как свидетельствуют рассчитанные по формуле (2.27) графика потенциала при $|E_1| = 2|E_2|$ и $\delta = 2h_0$, а затем вторых разностей $\Delta U_{r,2}^A$ и $\Delta U_{z,1}^A$ (рис.13а), центр пласта, как и при фильтрации вод, отмечается $\Delta U_{r,2}^A$ и $\Delta U_{z,1}^A$ довольно интенсивным минимумом на кривой U и весьма четким пересечением кривых $\Delta U_{r,2; z,1}^A$ дивергентных установок.

Если пресные воды проникают в пласт, то на его боковых поверхностях также возникнет контактная разность потенциалов E_x , убывающая с глубиной по закону $E_x = E_1 \frac{h_0}{x}$ (рис.13 а,б) и выражение для потенциала на дневной поверхности [10] будет иметь вид

$$U^A = E_1 \left[\operatorname{arctg} h_1 - \operatorname{arctg} h_2 + h_1 \ln \frac{\sqrt{1+h_1^2}}{h_1} - h_2 \ln \frac{\sqrt{1+h_2^2}}{h_2} \right] E_1. \quad (2.27a)$$

Все величины здесь сохраняют прежние обозначения.

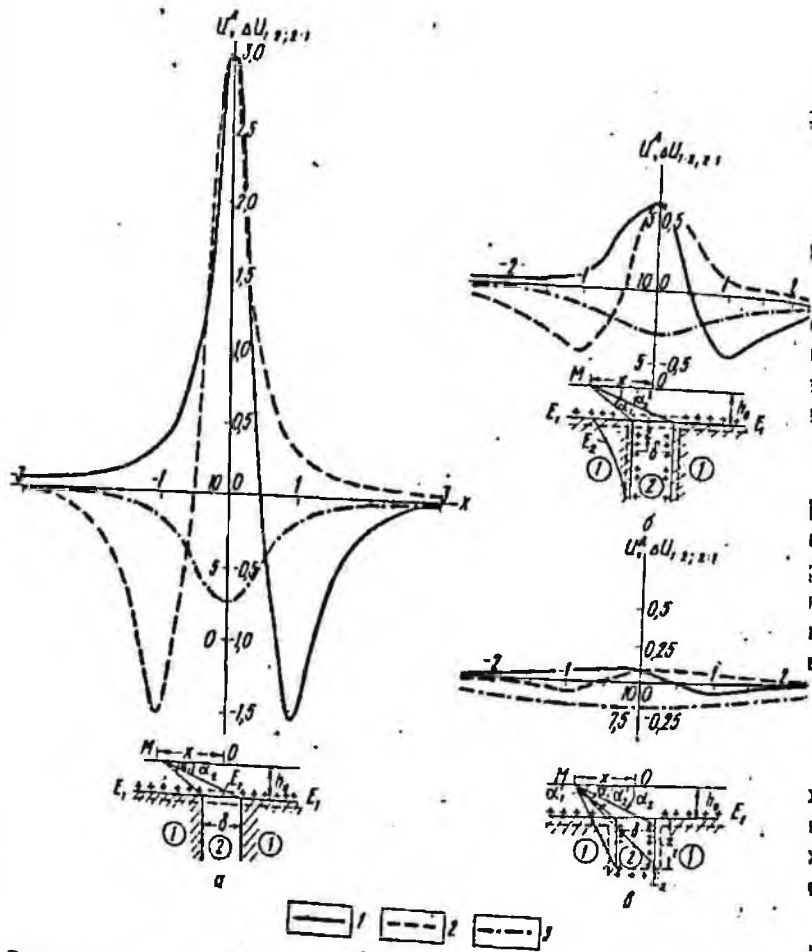


Рис. 13. Кривые $\Delta U_{1,2; 2,1}^A$ дивергентных установок в естественном диффузионно-адсорбционном происхождении: при отсутствии (а) и в наличии процессов диффузии на боковых границах пласта (б), а также на боковых границах пласта: 1 - $\Delta U_{1,2}^A$; 2 - $\Delta U_{2,1}^A$; 3 - U .

Сопоставлению кривых $\Delta U_{1,2}^A$ и $\Delta U_{2,1}^A$ в этом случае с однокривыми кривыми при отсутствии процессов диффузии на контактах пласта с вмещающими породами (см. рис. 13, а) показывает, что в связи с наличием положительных зарядов вдоль боковых границ пласта особенность аномалий уменьшается, но все характерные качественные особенности графиков дивергентных установок сохраняются.

Для случая проникновения пресных вод в пласт до глубины h_2 выражение для потенциала преобразуется [10] к виду

$$U^A = E_1 - \frac{\arctg h_1' - \arctg h_2'}{\pi} (E_1 + E_2), \quad (2.276)$$

$$h_1' = \frac{h_0 + h_2^2}{x - \frac{h_0^2}{2}}, \quad h_2' = \frac{h_0 + h_2^2}{x + \frac{h_0^2}{2}}$$

Полученные на основании этой формулы графики потенциала и разности потенциалов (рис. 13, б) свидетельствуют о еще большей затухающей аномалии. В этих условиях преимущества кривых дивергентных установок еще более очевидны, так как пересечение их над центром пласта остается достаточно четким даже при весьма пологих минимумах графиках потенциала.

Приведенный пример еще раз наглядно показывает, что и в поле диффузионно-адсорбционного происхождения возмущающие объекты фиксируются более четко дивергентными установками, чем обычными. Центр ристого пласта отмечается отчетливым пересечением кривых прямых и обратных установок, а расстояние между их минимумами, предвещая мощность пласта, дает представление о его горизонтальных размерах.

§ 4. ПОЛЯ ГАЛЬВАНОКОРРОЗИИ ТРУБОПРОВОДОВ

Исследование естественных электрических полей коррозионного происхождения относится к решению инженерно-геологических задач и применяется для выявления корродировавшихся участков трубопроводов. Такие участки являются обычно анодными зонами и в отличие от рассмотренных естественных полей отмечаются максимумами потенциала.

Источниками поля служат участки подверженных коррозии труб и нарушения их изоляции. В зависимости от протяженности упомянутых участков поле коррозионного происхождения можно аппроксимировать точечным или линейным источником; при этом длина последнего может быть неограничена или иметь конечное значение. Изучая распределение поля коррозии на дневной поверхности, можно установить местоположение повреждения трубопровода. Применение здесь дивергентных установок дает не только более надежные результаты, но имеет также и другие технические преимущества, связанные с меньшей чувствительностью к промышленным помехам. Именно это обстоятельство было положено в основу рекомендации трехэлектродной приемной установки, позволяющей измерять вторую производную даже при условии выравнивания

сопротивления заземления на каждой точке для изучения трасс трубопроводов [10].

Рассмотрим коротко характер графиков дивергентных установок в полях перечисленных видов источников, полагая что все они находятся в однородном полупространстве на некоторой глубине от ее поверхности.

Потенциал, создаваемый в произвольной точке дневной поверхности точечным источником коррозии, с которым совмещено начало дивертанта, [10] будет иметь вид

$$U^{KT} = q \frac{1}{\sqrt{x^2 + y^2 + h^2}}$$

где $q = \frac{I_0}{2\pi}$; ρ_0 - удельное электрическое сопротивление среды, в которой находится трубопровод; h - глубина его заложения. Из этого равенства за исходное, легко найти напряженность и производную вдоль оси x , перпендикулярной к направлению трубопровода,

$$E_x^{KT} = q \frac{x}{(x^2 + y^2 + h^2)^{3/2}}$$

$$E_y^{KT} = -q \frac{y}{(x^2 + y^2 + h^2)^{3/2}}$$

а также выражения для величин, регистрируемых дивергентными датчиками,

$$E_{1;2;2;1}^{KT} = \frac{q}{3} \frac{1}{(x^2 + y^2 + h^2)^{3/2}} \left[3x - \frac{3h^2 + y^2 - 2x^2}{2x^2 + y^2 + h^2} \right]$$

Аналогичные выражения можно записать и для составляющих по оси y . По внешнему виду приведенного равенства легко установить, что в предыдущих случаях, графики $E_{1;2}^{KT}$ и $E_{2;1}^{KT}$ пересекаются над трубопроводом, даже независимо от значения y , и имеют максимальных значений при $y=0$. То же самое можно сказать о результатах наблюдений вдоль оси y . Таким образом, для локализации точечного источника необходимо иметь либо серию наблюдений вкост трубопровода, либо два взаимно перпендикулярных профиля, проходящих через аномальную зону. Локализация источника коррозии является решением задачи, так как глубина его заложения как правило, известна.

Если протяженность источника тока гальванокоррозии достаточно большая и ее можно считать бесконечной, то потенциал U^{KT} вдоль дивертанта, совпадающего с осью x , будет иметь вид [10],

$$U^{KT} = q \ln(x^2 + h^2) \quad (2.32)$$

$$E_{1;2;2;1}^{KT} = \frac{2q}{3(x^2 + h^2)^{3/2}} \left[3x - \frac{3(x^2 - h^2)}{2(x^2 + h^2)} \right] \quad (2.33)$$

В точке пересечения кривых, совпадающая и в этом случае с началом дивертанта, фиксирует местоположение трубопровода. Вполне очевидно, подобная картина будет наблюдаться и при источнике конечной длины, ибо поля всех источников, как показано в работе [10], отличаются незначительно. В связи с этим было рассчитано наиболее четкое поле точечного источника (рис.14) и на его примере исследовано влияние на результаты наблюдений размеров приемных линий, которые всегда имеют конечную длину. Как показывает сопоставление графиков, полученных при $MO/h = 0,2; 0,6$ и 1 , качественно они все одинаковы и пересекаются над источником, а меняются только интенсивность аномалии и абсциссы экстремумов. Различие значений кривых $E_{1;2}^{KT}$, полученных при неодинаковых приемных линиях, вызвано тем, что нормирование наблюдаемых данных только размером приемных линий, указывавшее в гл.1, недостаточно строго учитывает влияние последних. С точки зрения смещения экстремумов, по горизонтали ближе к предельным кривым $E_{1;2}^{KT}$ и $E_{2;1}^{KT}$ находятся результаты наблюдений при $MO/h = 1$, т.е. при линиях, соизмеримых с глубиной заложения источника. Тем не менее при любом виде трансформации, что эквивалентно произвольному размеру приемных линий и свободному их выбору, сообразуясь только с техническими условиями, задача установления положения поврежденных участков трубопроводов решается достаточно уверенно и однозначно. Проанализировав характерные особенности двусторонних дивергентных установок в естественных электрических полях, отметим, что наличие вместо одной двух наблюдаемых кривых и полярных их дифференциация обуславливает появление дополнительных локальных точек, а соответственно повышенную разрешающую способность к локализации источников естественного электрического поля независимо от их прохождения. Это вполне закономерное явление, так как во внешней среде естественные поля любого происхождения заменя-

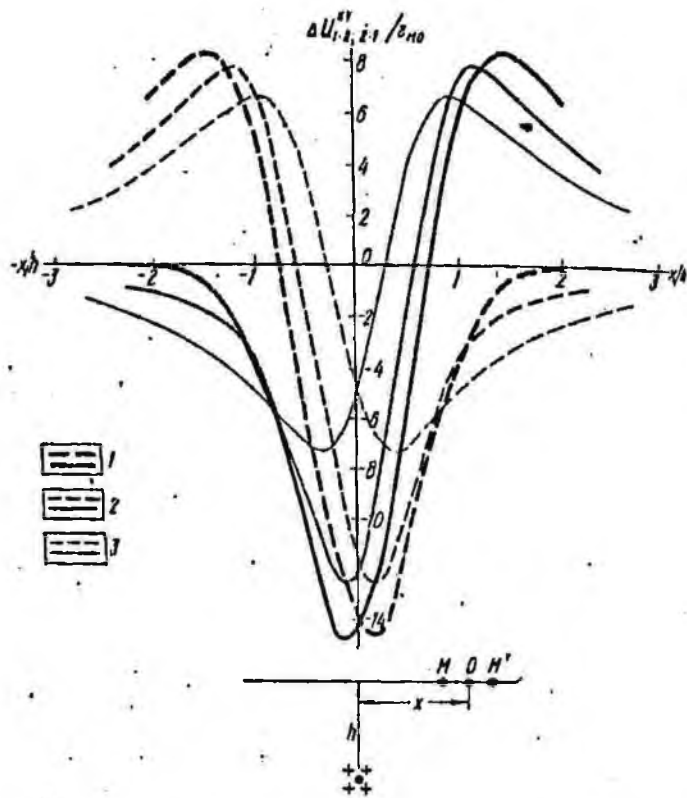


Рис. 14. Кривые $\Delta U_{1,2}^{M'}$ дивергентных установок в поле гальванокоррозии: 1 - $MO/h = 1,0$; 2 - $MO/h = 0,6$; 3 - $MO/h = 0,2$; $\Delta U_{1,2}^{M'}$ - сплошная линия; $\Delta U_{2,1}^{M'}$ - штриховая.

отся влиянием точечных или линейных источников либо заряженные в электрических полях. Учитывая, что регистрируемые дивергентными приемными установками величины заметно больше вторых производных (разностей) потенциала, применение их в рассмотренных выше естественных электрических полях вполне реально.

Глава 3 ДИВЕРГЕНТНЫЕ УСТАНОВКИ В ИСКУССТВЕННЫХ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ ПОЛЯХ

В методах, использующих активные электрические поля, наряду с электродными приемными линиями ИОМ' всегда присутствует источник тока в виде точечного электрода, диполя или линии конечной длины АВ в методе сопротивлений либо заряда в проводящих породах методе заряженного тела. Рассмотрим более подробно характер и особенности теоретических кривых различных установок в упомянутых методах.

§ 1. МЕТОД СОПРОТИВЛЕНИЯ

В методе сопротивления наиболее удобной для наблюдения (с технической точки зрения) является линия АВ, ибо при этом не требуется относить один из питающих электродов на бесконечность (как, например, при исследованиях однополюсными источниками) и обеспечивает большой по сравнению с диполями уровень измеряемых величин. В то же время для анализа характера теоретических кривых наиболее удобными являются установки (АМ, АМ', АМОМ'), являющиеся частью двухполюсных установок (АМВ, АМВВ и АМОМ, В). В связи с этим, принимая за основные дивергентные установки в модификации схемы единичных разностей градиентов $A \rightarrow M_{1,2} \quad O_{2,1} \quad M' \rightarrow B$ и двухсторонних зондирования $A \rightarrow M_{1,2} \quad O_{2,1} \quad M' \rightarrow B$, для теоретического анализа установления характерных особенностей кривых будем также использовать составляющие их простые установки.

Учитывая, что дивергентные измерения симметричными установками рациональны и дают дифференцированные наблюдаемые кривые при наложении горизонтальных неоднородностей в разрезе, рассмотрим простейшие примеры последних типа одной и двух вертикальных границ раздела: горизонтально-вертикальных контактов, наклонных границ, локальных включений в виде погруженной сферы и полусферической выемки. расчеты будем вести при обычной в таких случаях идеализации:

Вертикальный контакт

Рассмотрим общий случай профилирования и зондирования вертикального контакта двухсторонними дивергентными установками $A \rightarrow M_{1,2} \quad O_{2,1} \quad M' \rightarrow B$, расположенными под углом α к его плоскости.

Приводившиеся нами ранее выражения для установки $A \rightarrow M$, ориентированной также по отношению к вертикальному контакту являются частным случаем как в отношении питающей (отсутствует второй электрод В), так и приемной ($r_1 = r_2$) линии.

Учитывая, что упомянутые установки удобны для площадных или внутри интервала АВ по планшетах, рассмотрим самые общие случаи расположения приемной линии на боковых профилях, параллельных центральному и удаленных от него по обе стороны на расстоянии h . Отсюда при $h=0$ легко будет получить частные формулы для установок, совмещенной с осью x . Условимся, что слева от оси та, располагающегося по середине отрезка АВ находится положительный электрод А. Регистрируемые дивергентными установками разности потенциалов определим также в общем виде (при произвольном выборе добавочных сопротивлений r_1 и r_2), используя соотношения (1.2) и потенциалы электродов М, О и М', найденные с помощью зеркальных изображений.

Отсюда промежуточные выкладки, приведем конечные формулы определения кажущихся сопротивлений для четырех возможных случаев размещения приемных электродов.

1. Все приемные электроды располагаются в первой среде:

$$\rho_{1:2(1:1)}^{(1)} = 1 + K_{12} K_{1:2(1:1)}^* \left[\frac{r_{1(1)}}{r_1 + r_2} \rho_M^{(1)} + \frac{r_{2(1)}}{r_1 + r_2} \rho_{M'}^{(1)} - \rho_0^{(1)} \right] \quad (0 < x_0 \leq d - a \pm h \operatorname{ctg} \alpha)$$

2. Электроды М и О находятся в первой среде, М' - во второй:

$$\rho_{1:2(1:1)}^{(2)} = 1 + K_{12} K_{1:2(1:1)}^* \left[\frac{r_{1(1)}}{r_1 + r_2} \rho_M^{(1)} + \frac{r_{2(2)}}{r_1 + r_2} \rho_{M'}^{(2)} - \rho_0^{(1)} \right] \quad (d - a \pm h \operatorname{ctg} \alpha \leq x_0 \leq d \pm h \operatorname{ctg} \alpha)$$

3. Электрод М расположен в первой среде, О и М' - во второй:

$$\rho_{1:2(1:1)}^{(2)} = 1 + K_{12} K_{1:2(1:1)}^* \left[\frac{r_{1(1)}}{r_1 + r_2} \rho_M^{(1)} + \frac{r_{2(2)}}{r_1 + r_2} \rho_{M'}^{(2)} - \rho_0^{(2)} \right] \quad (d \pm h \operatorname{ctg} \alpha \leq x_0 \leq d + a \pm h \operatorname{ctg} \alpha)$$

4. Все приемные электроды расположены во второй среде:

$$\rho_{1:2(1:1)}^{(2)} = 1 + K_{12} K_{1:2(1:1)}^* \left[\frac{r_{1(1)}}{r_1 + r_2} \rho_M^{(2)} + \frac{r_{2(2)}}{r_1 + r_2} \rho_{M'}^{(2)} - \rho_0^{(2)} \right] \quad (3.4)$$

$$(d + a \pm h \operatorname{ctg} \alpha \leq x_0 \leq l)$$

В приведенных формулах нижними индексами у ρ обозначен вид установки: прямая (1:2) или обратная (2:1); а верхними - тип неоднородности (δ - вертикальная) и среды, в которых располагаются приемные электроды М, О и М'; $K_{12} = -K_{21} = \frac{\rho_2 - \rho_1}{\rho_2 + \rho_1}$ - коэффициент отражения; $K_{1:2} = \frac{\rho_2}{\rho_1}$ - отношение сопротивлений сред, указанных в индексах; x_{AM} - расстояние по оси x между электродами, указанными в индексах; при этом $x_{AO} = x_{AM} + a = x_{AM} - a$, где $a = MO = OM$ - размер приемной полулинии, а r_1 и r_2 - подключаемые к ним добавочные сопротивления.

$$K_{1:2(1:1)}^* = \frac{K_{1:2(1:1)}}{2K} = \frac{r_{1(1)}}{r_1 + r_2} \frac{1}{\sqrt{x_{AM}^2 + h^2}} + \frac{r_{2(1)}}{r_1 + r_2} \frac{1}{\sqrt{x_{AM'}^2 + h^2}} - \frac{1}{\sqrt{x_{AO}^2 + h^2}}$$

$K_{1:2}$ и $K_{2:1}$ - коэффициенты двусторонних установок; $\rho_M^{(1)}$ - коэффициент, учитывающий влияние вертикального (δ) контакта на приемные электроды, указанные в нижнем индексе и расположенные в средах, показанных в скобках при δ .

$$\rho_{M(O;M')}^{(1)} = \frac{1}{R_{AM(O;M')} + R_{BM(O;M')}} \quad \delta(1)$$

$$\rho_{M(O;M')}^{(2)} = \frac{1}{R_{AM(O;M')} + R_{BM(O;M')}} \left(K_{12} \left(\frac{1}{R_{AM(O;M')}} - \frac{1}{R_{BM(O;M')}} \right) \right) \quad \delta(2)$$

$$\rho_{M(O;M')}^{(2)} = \frac{1}{R_{AM(O;M')} + R_{BM(O;M')}} \quad \delta(2)$$

где $R_{AM(O;M')}$ - расстояния между электродами, указанными в индексах, выделенные в долях размера питающей линии АВ = $l = 1$; при этом A' и B' обозначают зеркальные изображения питающих электродов А и В относительно границы раздела сред;

$$R_{AM(O;M')} = \sqrt{x_{AM(O;M')}^2 + h^2}$$

$$R_{AM(O;M')} = \sqrt{(2d \sin \alpha \cos \alpha \pm h)^2 + (2d \sin^2 \alpha - x_{AM(O;M')})^2}$$

$$R_{BM(O;M')} = \sqrt{(1 - x_{AM(O;M')})^2 + h^2}$$

$$R_{B'M(O;M')} = \sqrt{[2(t-d) \sin \alpha \cos \alpha \mp h]^2 + [2(t-d) \sin^2 \alpha - (1 - x_{AM(O;M')})]^2}$$

ось d - расстояние до контакта от электрода А; α - угол наклона оси установки к плоскости контакта.

Расчитанные по формулам (3.1) - (3.4), кривые двусторонних установок при $\alpha = 60^\circ$ по центральному ($h = 0$) и двум боковым ($\pm 0,4$) профилям (рис. 15) свидетельствуют, что вертикальный такт (при $\rho_1 < \rho_2$) на всех профилях отмечается четкими минимумами прямой ($\rho_{1;2}$) и максимумами обратной ($\rho_{2;1}$) установок, широта которых соответствует размеру приемной линии MM' . Интенсивность экстремумов на центральном и боковых профилях отличается незначительно и на полевых материалах будет практически одинакова. Взяв с этим дивергентные установки в модификации съемки средних значений градиентов могут с успехом использоваться для площадных исследований и картирования в их пределах неоднородностей различной ориентации. Поэтому на примере простейшей неоднородности - вертикального контакта попытаемся оценить их разрешающую способность сравнением с применяемыми в настоящее время установками, и рассмотрим частные случаи приведенных выше формул, которые мало отличаются по результатам, но легче поддаются теоретическому анализу позволяют получить простые соотношения.

В частном случае при $h = 0$

$$R_{AMCO;M'J} = x_{AMCO;M'J}$$

$$R_{AMCO;M'J} = \sqrt{4d \sin^2 \alpha (d - x_{AMCO;M'J}) + x_{AMCO;M'J}^2}$$

$$R_{BMCO;M'J} = 1 - x_{AMCO;M'J}$$

$$R_{B'MCO;M'J} = \sqrt{4(1-d) \sin^2 \alpha (x_{AMCO;M'J} - d) + (1 - x_{AMCO;M'J})^2}$$

Наличие в выражениях R_{AM} и $R_{B'M}$ члена $\pm (d - x_{AM})$ свидетельствует о том, что на контакте при $d = x_{AM}$ независимо от величины угла α $R_{AM} = x_{AM}$, а $R_{B'M} = 1 - x_{AM}$, т.е. на расстоянии от немногого электрода на контакте до источников тока и их зеркальных образов равны.

Нетрудно убедиться, что при расположении установки перпендикулярно к контакту, т.е. при $\alpha = 90^\circ$ равенства (3.1) - (3.4) совпадают с выражениями, полученными для этого частного случая [22].

Для оценки разрешающей способности определим экстремальные значения ИС прямой и обратной установок над вертикальным контактом, т.е. при $\alpha_{10} = d$. Для этого частного случая с помощью сложных преобразований формулы (3.2) или (3.3) получим следующие выражения:

$$\frac{\rho_{1;2;1;1}}{\rho_1} = 1 + k_{12} - k_{12} K^* 2d \left[\frac{r_{121}}{r_1 + r_2} \frac{1}{d^2 - d^2} + \frac{r_{122}}{r_1 + r_2} \frac{K_{12}}{(1-d)^2 - d^2} \right].$$

Из соотношения (3.5) видно, что на величину экстремальной не сопротивления сред (K_{12} и k_{12}), влияют также размеры установочные электроды контактные не пересекают, $(\alpha$ и $K^*)$ и расстояние от контакта до питающего электрода (d). Влияние этого влияния можно оценить по рассчитанным по формулам (3.6) зависимостям, показанным на рис. 16. Из них следует, что при смещении контакта от центра питающей линии АВ в сторону электрода, расположенного в высокоомной среде, амплитуда аномалии уменьшается, а при движении в противоположную сторону увеличивается. Если контакт располагается точно по середине линии АВ и $d = 0,5$, выражение (3.5) упрощается и из него легко получить

$$\frac{\rho_{1;2}}{\rho_1} = 2 - k_{12} \quad \text{или} \quad \rho_{1;2}^B = 2\rho_1 - \rho_2,$$

$$\frac{\rho_{2;1}}{\rho_1} = 2k_{12} - 1 \quad \text{или} \quad \rho_{2;1}^B = 2\rho_2 - \rho_1.$$

Таким образом, на примере вертикального контакта мы убеждаемся в справедливости полученных ранее иным способом соотношений (1.27); (1.28) для симметричного расположения питающих и приемных электродов. Эти формулы позволяют легко определить и амплитуду аномалии для этого частного случая в соответствии с ранее приводившимися формулами (1.34); (1.34а). Разность экстремальных значений, по А. Г. Боровому, будем относить к их сумме, так как для вертикального контакта определить сопротивление вмещающих пород нельзя. С учетом сказанного амплитуда аномалии над вертикальным контактом для симметричных установок $A \rightarrow M r_{1;2} \sigma_{1;1} M' \leftarrow B$ составит

$$A_{1;2;1;1} = \frac{2\rho_2 - \rho_1 - (2\rho_1 - \rho_2)}{2\rho_2 - \rho_1 + 2\rho_1 - \rho_2} = \frac{3(\rho_2 - \rho_1)}{\rho_1 + \rho_2} = 3k_{12}.$$

Для обычной установки метода срединного градиента та же величина равняется разности сопротивления контактирующих сред:

$$A_{ср.г} = \frac{\rho_2 - \rho_1}{\rho_1 + \rho_2} = k_{12}, \quad (3.9)$$

что втрое меньше $A_{1;2;2;1}$

Аналогичным способом можно определить амплитуды аномалии и для других видов установок. Так, в частности, для прямой трехэлектродной установки АМN и примерно идентичной ей по результатам установки ВАНM для случая, подобного рассмотренному выше, когда электроды контактные не пересекают,

$$A_{AMN} = \frac{\rho_2(1+k_{12}) - \rho_1(1-k_{12})}{\rho_2(1+k_{12}) + \rho_1(1-k_{12})} = k_{12} \quad (3.10)$$

для обратных MNB и MNBA

$$A_{MNB} = \frac{\rho_2(1+k_{12}) - \rho_2(1-k_{12})}{\rho_2(1+k_{12}) + \rho_2(1-k_{12})} = k_{12}. \quad (3.11)$$

Максимальная амплитуда аномалии в области контакта для двусторонних трехэлектродных (AMN и MNB) и дипольных (ВАНM и MNAB) установок

$$A_{AMN, MNB} = \frac{\rho_2(1+k_{12}) - \rho_2(1-k_{12})}{\rho_2(1+k_{12}) + \rho_1(1-k_{12})} = \frac{\rho_2^2 - 1}{\rho_2^2 + 1} \quad (3.12)$$

Таким образом, над вертикальным контактом, пересекаемым только приемной линией, амплитуды аномалии на графиках срединного градиента и несимметричных установок АМN и MNB в отдельности равны между собой и втрое меньше, чем для двусторонних дивергентных установок.

Амплитуды аномалии двусторонних трехэлектродных и дипольных установок при тех же условиях, как показывают расчеты по формулам (3.8) и (3.12), примерно в 2,4 раза меньше, чем у дивергентных, даже в модификации съемки срединных разностей градиентов.

В то же время такой вид наблюдений, хотя и самый удобный на практике, но уступает по разрешающей способности несимметричным установкам дивергентных установок, величину аномалий которых можно оценивать над вертикальным контактом оценки на примере самых простых установок $A \rightarrow M r_{1;2} \sigma_{1;1} M'$.

Формула для расчета кажущегося сопротивления в области такта в этом случае будет иметь вид

$$\frac{\rho_{1,2}^{(12)}}{\rho_1} = 1 + \bar{k}_{1,2}^* k_{12} \left[\frac{1}{r_1 + r_2} \frac{1}{2d - x + a} + \frac{r_{1(2)}}{r_1 + r_2} \frac{1}{x + a} - \frac{1}{2d - x} \right]$$

Здесь $\bar{k}_{1,2}^* = \frac{k_{1,2}^{(12)}}{2d}$ — коэффициент установки, x и a — расстояния от питающего электрода приемной линии и контакта соответственно, $a = MO = OM$. Если выразить все линейные расстояния в единицах размера тактов $x = 1$, то для кажущегося сопротивления на контакте при расположении электрода А в среде ρ_2 будем иметь общую формулу

$$\frac{\rho_{1,2}^{(12)}}{\rho_1} = 1 + k_{12} \bar{k}_{1,2}^* \frac{a}{1 + a}$$

а для отдельных установок с учетом индивидуальных коэффициентов

$$\frac{\rho_{1,2}^{(1)}}{\rho_1} = 1 - k_{12} \frac{3(1-a)}{3a+1}$$

$$\frac{\rho_{2,1}^{(2)}}{\rho_2} = 1 + k_{12} \frac{3(1-a)}{3a-1}$$

$$\frac{\rho_{1,1}^{(2)}}{\rho_1} = 1 - k_{12} \frac{1-a}{a}$$

Если среда ρ_1 будет высокоомной, то это учтется знаком, который в этом случае будет отрицательным.

Из приведенных формул следует, что абсолютные значения коэффициентов возрастает по мере уменьшения размеров приемной линии. В предельных случаях при $a \rightarrow 0$ составят $\frac{\rho_{1,2}^{(1)}}{\rho_1} = 1 - 3k_{12}$ и $\frac{\rho_{2,1}^{(2)}}{\rho_2} = 1 + 3k_{12}$; а при $k_{12} = +1$ и -1 $\frac{\rho_{1,2}^{(1)}}{\rho_1} = -2$ и $\frac{\rho_{2,1}^{(2)}}{\rho_2} = +4$. Таким образом, при смене знака предельных значений k_{12} экстремальные точки для $\rho_{1,2}^{(1)}$ и $\rho_{2,1}^{(2)}$ как бы меняются местами, что означает равенство минимума прямой установки минимуму обратной и наоборот.

64

Для симметричной приемной установки с одинаковыми добавочными сопротивлениями $\rho_{1,1}^{(2)}$ при $a \rightarrow 0$ независимо от величины экстремальные значения изменяются от $-\infty$ до $+\infty$. Наглядно характер зависимости разрешающей способности от разрыв приемной линии для различных значений k_{12} показан на рис. 16.

Формулы (9.15) — (9.17) позволяют также определить размеры приемной линии, при которой в разрезе с заданным k_{12} появляются кривые отрицательные значения. В частности, $\rho_{1,2}^{(12)} < 0$, если $\frac{3(1-a)}{3(1-a)} - 1 - \rho_{1,2}^{(12)} < 0$ при $k_{12} < \frac{3a-1}{3(1-a)}$ и $\rho_{1,1}^{(2)} = 0$ при $k_{12} < \frac{a}{1-a}$. Но также и наоборот по наблюдаемым экстремальным значениям, зная размеры установок, оценить примерно величину k_{12} соотношения сопротивлений сред.

Вертикальный контакт является самой простой неоднородностью, характерные элементы кривых КС дивергентных установок над ней в таком же или несколько видоизмененном виде встречаются и над другими, более сложными формами. Поэтому, а также в связи с относительной простотой предельных формул, нами были проведены более детальный анализ и сопоставление разрешающей способности различных установок именно над вертикальным контактом.

Разминая изложенное, отметим, что разрешающая способность дивергентных установок примерно в 2,4 раза выше, чем дипольных установок, графики которых являются наиболее дифференцированными среди изменяемых в настоящее время при разведке установок. При всех прочих равных условиях, дивергентные установки имеют несомненные преимущества при картировании вертикальных границ или других неоднородностей еще и потому, что последние на кривых $\rho_{1,2}$ и $\rho_{2,1}$ отмечаются четкими экстремумами, равными по ширине размерам приемной линии, а ложные аномалии в приконтактной зоне или вовсе отсутствуют, или же амплитуда их намного меньше основных. Это свойство графиков дивергентных установок особенно ценно при картировании близких неоднородностей.

Рассмотрим также кратко результаты зондирования дивергентными установками при наличии вертикального контакта. Для этого случая справедливы те же формулы, что и для профилирования, однако, учитывая что центр зондирования остается неподвижным, а питающие электроды симметрично удаляются, удобнее формулы записать, обозначив через A_0 — постоянное расстояние от центра зондирования до контактов, через A — $AO = OB$ — подуровень питающей линии. С учетом этих обозначений запишем выражения для КС зондирования установками, рас-

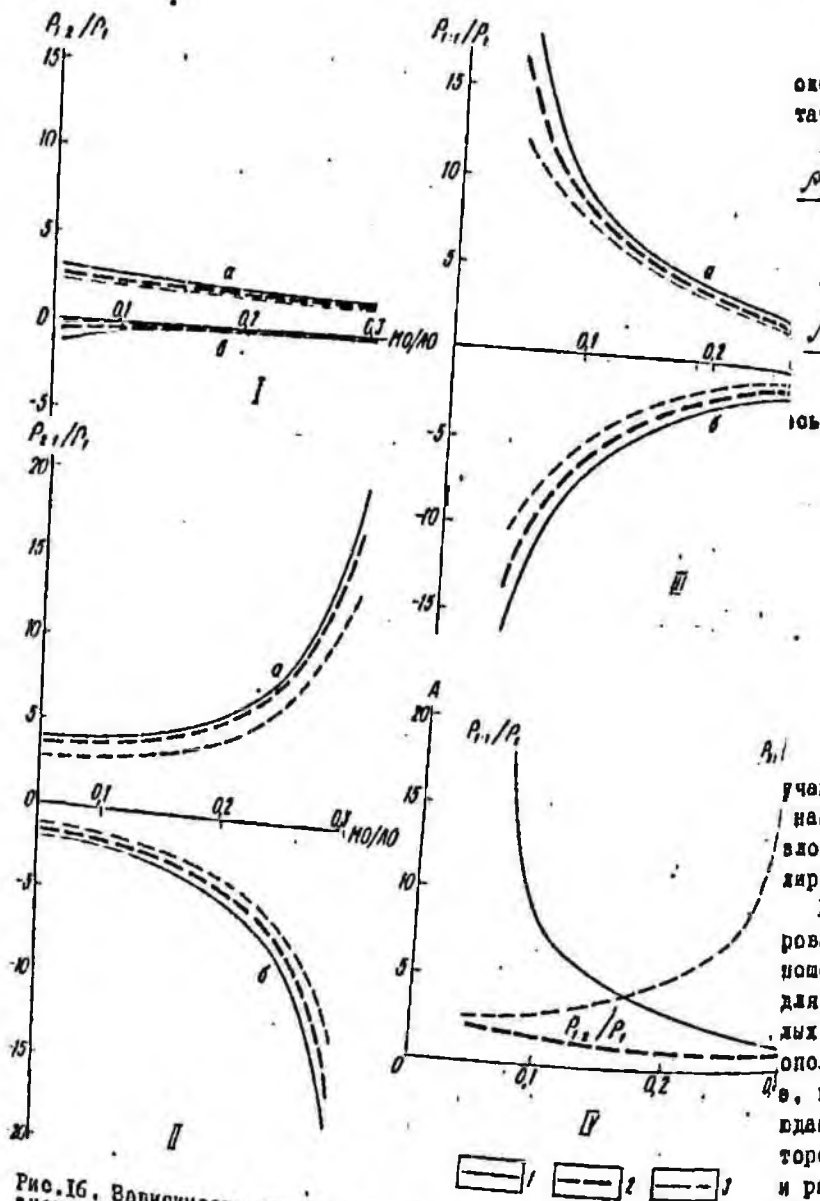


Рис. 16. Взаимности значений экстремальных точек I-III и амплитуды аномалии IV различных дивергентных установок от размера приемной линии над вертикальным контактом двух сред; а - $k_{12} < 0$; б - $k_{12} \geq 0,9$; в - $k_{12} \geq 0,8$; г - $k_{12} = 0,4$.

оленными перпендикулярно к плоскости контакта, для двух вполне точных с точки зрения анализа и практики случаев.

1. Вся установка располагается в первой среде:

$$\frac{\rho_{12(211)}^{k(11)}}{\rho_1} = 1 + k_{12} K_{12(211)}^* \left[\frac{r_{112}}{r_1 + r_2} \rho_M^{k(11)} + \frac{r_{112}}{r_1 + r_2} \rho_M^{k(11)} - \rho_0^{k(11)} \right] \quad (3.18)$$

$(R \neq d_0)$.

2. Электрод В во второй среде, а остальные - в первой:

$$\frac{\rho_{12(212)}^{k(11)}}{\rho} = 1 + k_{12} K_{12(212)}^* \left[\frac{r_{112}}{r_1 + r_2} \rho_M^{k(11)} + \frac{r_{112}}{r_1 + r_2} \rho_M^{k(11)} - \rho_0^{k(11)} \right] \quad (3.19)$$

$(R > d_0)$.

$$\rho_{M(0;M')}^{k(11)} = \frac{1}{\rho_{A'M(0;M')}^{k(11)}} - \frac{1}{\rho_{B'M(0;M')}^{k(11)}}$$

$$\rho_{M(0;M')}^{k(12)} = \frac{1}{\rho_{A'M(0;M')}^{k(12)}} - \frac{1}{\rho_{B'M(0;M')}^{k(12)}}$$

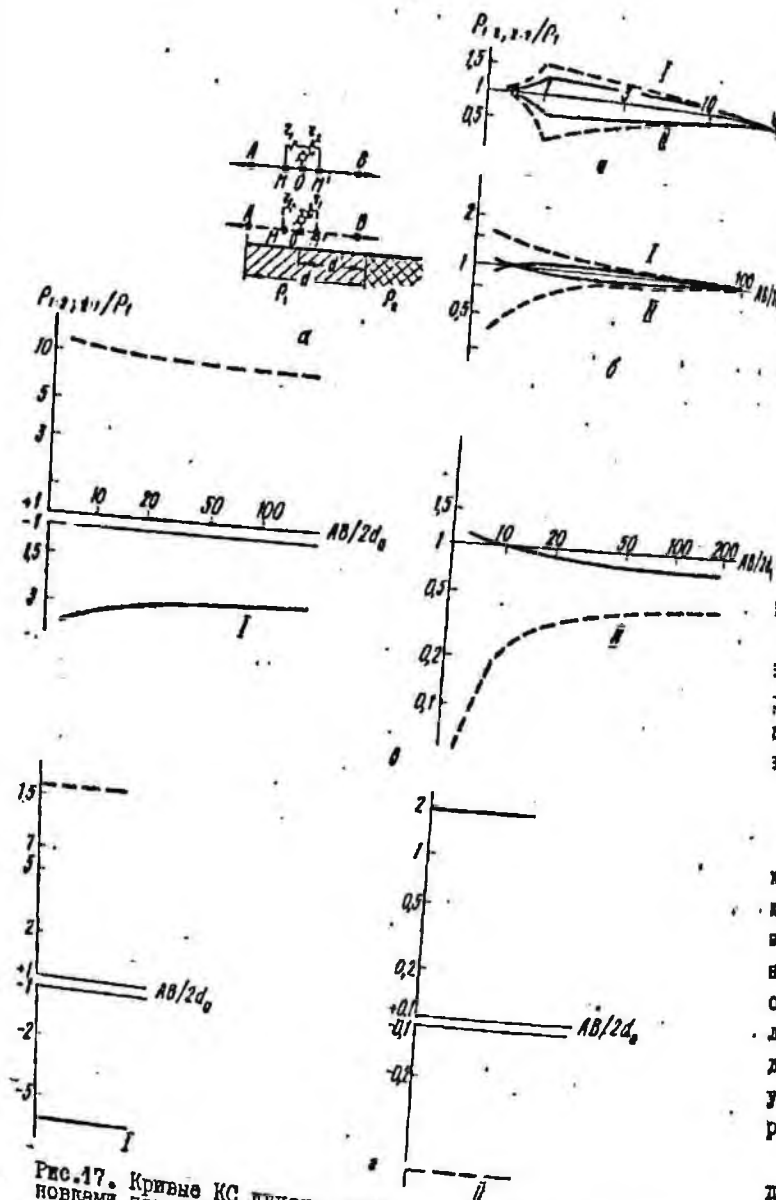
$$\rho_{A'M(0;M')}^{k(11)} = 2d_0 + \lambda + a[-a; 0],$$

$$\rho_{B'M(0;M')}^{k(11)} = 2d_0 - \lambda + a[-a; 0],$$

$$\rho_{B'M(0;M')}^{k(12)} = R + a[-a; 0].$$

учаи расположения контакта в интервале между приемными электродами не рассматривается, но при желании их легко можно получить аналогичным образом из приводившихся выше формул для установок пролирования.

Расчетанные по приведенным формулам кривые двусторонних зонирования при различном удалении их центра от контакта и разном соотношении сопротивлений сред ($k_{12} = 0$ и $1/9$) показаны на рис. 17. Как для обычных зонирования, кривые дивергентных установок при очень малых и больших расстояниях стремятся к сопротивлению среды, в которой располагается приемная линия, и претерпевают излом при $\frac{aR}{2d_0} = 1$, т. е. при переосечении питающим электродом контакта. Над последним наблюдается максимальное расхождение кривых дивергентных установок, которое сокращается постепенно как при уменьшении, так и возрастании расстояния. Конфигурация кривых при расположении приемной линии в высокоомной и низкоомной средах подобна, разница заключается лишь в том, что в первом случае ветви кривых по мере удаления от контак-



поднимаются вверх, а во втором - опадает вниз. Заметно также, амплитуда расхождения несколько выше при расположении центра дирования в высокоомной среде, что может представлять практическую интерес.

Однако, как свидетельствуют приведенные кривые, наиболее существенное влияние на величину расхождения ветвей дивергентных установок оказывает удаление их центра от контакта. Амплитуда аномалии увеличивается по мере приближения центра зондирования к контакту и в предельном случае, когда они совпадают, кажущиеся сопротивления определяются уже обычными выражениями (3.6) и (3.7). Используя последние и значения КС прямой и обратной ветвей зондирования, можно оценить и сопротивления контактирующих сред из соотношения

$$\rho_1 = \frac{1}{8} (\rho_{2,1}^2 + 2\rho_{1,2}^2) \quad \text{и} \quad \rho_2 = \frac{1}{3} (2\rho_{2,1}^2 + \rho_{1,2}^2). \quad (3.20)$$

Для сравнения напомним, что обычные кривые ВЗЗ в этом случае представляют собой прямые линии на уровне $\rho = \rho_1 (1 + k_{12})$.

Приведенный анализ, таким образом, подтверждает несомненные преимущества двусторонних зондирования дивергентными установками перед обычными, позволяющими не только выявлять границы раздела по различному сопротивлению, но и оценивать в ряде случаев их истинные сопротивления, что имеет немаловажное практическое значение.

Две вертикальные границы раздела

При решении многих поисково-разведочных и инженерно-геологических задач приходится встречаться с картированием границ крутопадающих пластов с различным электрическим сопротивлением. В то же время в электроразведочной литературе, как правило, рассмотрены только такие пласты (жилы) высокого или низкого сопротивления, залегающие в однородной среде. С целью частичного восполнения этого пробела и в лучение представления о характере графиков КС различных установок над чередующимися пластами неодинакового сопротивления рассмотрим случай двух вертикальных границ, разделяющих среды с различным электрическим сопротивлением.

Кривые КС двусторонних дивергентных установок $A-M-N-B$ будем рассматривать, сопоставляя их с данными среднего градиента ($A-M-N-B$), а также его составных частей - однополюсных симметричных установок $A-M-N$ и $M-N-B$. Для определенности условимся, что пласт тонкий, т.е. его мощность h в 3-4 раза меньше

Рис. 17. Кривые КС двусторонних зондирования дивергентными установками над вертикальным контактом: I - $\rho_{12} = 9$; II - $\rho_{12} = 1$; $\rho = MM/d_0 = 0,2$; $d_0 = 1$; $\rho = MM/d_0 = 2$; $d_0 = 0,1$; B - $MM/d_0 = 0,05$; $d_0 = \infty$; $d_0 = a$.

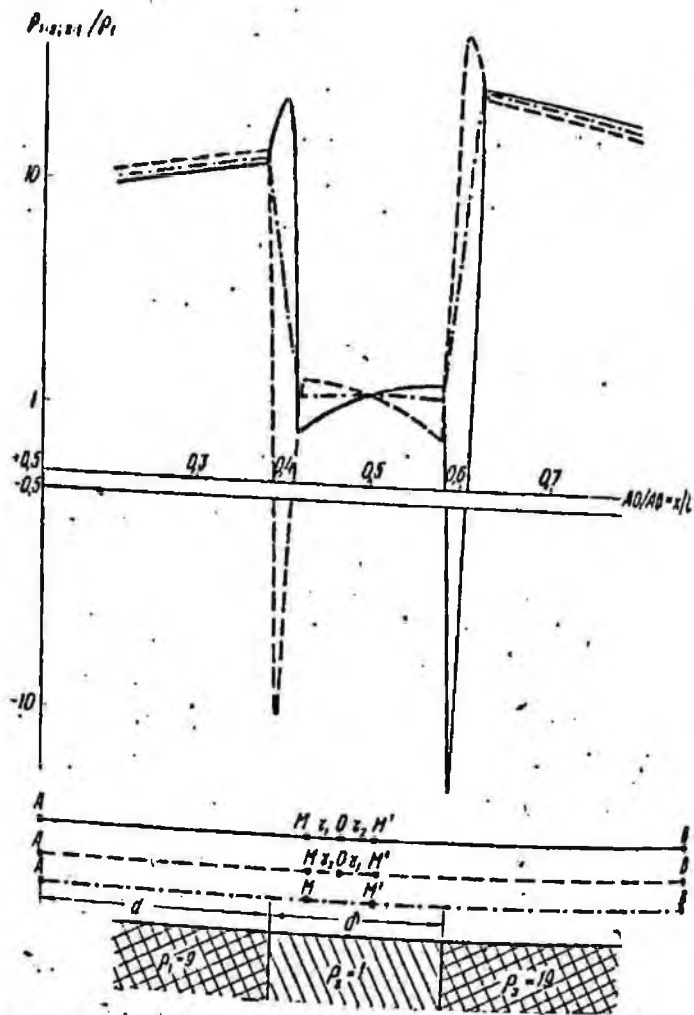


Рис.18. Кривые электропрофилеирования установкой \$A \leftarrow M \leftarrow O \leftarrow z \leftarrow M' \leftarrow B\$ над двумя вертикальными границами раздела.

размера питающей \$AB\$, но больше приемной линии \$M'N'\$ (\$AB \gg d > M'N'\$), загибается по центру питающей линии, перпендикулярно к границе полностью укладывается в интервал наблюдения.

Пусть сопротивление пласта \$\rho_2\$; слева от него располагается среда \$\rho_1\$ с питающим электродом \$A\$, справа - среда \$\rho_3\$ с электродом \$B\$ (рис.18).

В соответствии с методикой полевых наблюдений в методе съемки единичных равностей градиентов при неподвижных питающих заземленных емеем семь случаев различного расположения приемных электродов относительно границ и соответственно столько же расчетных формул, торые приводятся ниже.

1. Вся приемная линия располагается в первой среде:

$$\frac{\rho_{1,2(1,1)}}{\rho_1} = 1 + K^* \frac{1}{1,2(1,1)} \left[\frac{r_{2(1)}^{(1)}}{r_1 + r_2} \rho_M^{(1)} + \frac{r_{1(1)}^{(1)}}{r_1 + r_2} \rho_{M'}^{(1)} - \rho_0^{(1)} \right] \quad (3.21)$$

(\$0 < z_0 < d - a\$).

2. Электроды \$M\$ и \$O\$ находятся в первой среде, \$M'\$ - в пласте:

$$\frac{\rho_{1,2(2,1)}}{\rho_1} = 1 + K^* \frac{1}{1,2(2,1)} \left[\frac{r_{2(1)}^{(1)}}{r_1 + r_2} \rho_M^{(1)} + \frac{r_{1(2)}^{(2)}}{r_1 + r_2} \rho_{M'}^{(2)} - \rho_0^{(1)} \right] \quad (3.22)$$

(\$d - a < z_0 < d\$).

3. Электрод \$M\$ расположен в первой среде, а \$O\$ и \$M'\$ - в пласте;

$$\frac{\rho_{1,2(2,1)}}{\rho_1} = 1 + K^* \frac{1}{1,2(2,1)} \left[\frac{r_{2(1)}^{(1)}}{r_1 + r_2} \rho_M^{(1)} + \frac{r_{1(2)}^{(2)}}{r_1 + r_2} \rho_{M'}^{(2)} - \rho_0^{(2)} \right] \quad (3.23)$$

(\$d < z_0 < d + a\$).

4. Вся приемная линия находится в пласте:

$$\frac{\rho_{1,2(2,1)}}{\rho_1} = 1 + K^* \frac{1}{1,2(2,1)} \left[\frac{r_{2(1)}^{(1)}}{r_1 + r_2} \rho_M^{(2)} + \frac{r_{1(2)}^{(2)}}{r_1 + r_2} \rho_{M'}^{(2)} - \rho_0^{(2)} \right] \quad (3.24)$$

(\$d + a < z_0 < d + a + a\$).

5. Электроды \$M\$ и \$O\$ находятся в пласте, \$M'\$ - за пластом в третьей среде:

$$\frac{\rho_{1,2(2,1)}}{\rho_1} = 1 + K^* \frac{1}{1,2(2,1)} \left[\frac{r_{2(1)}^{(1)}}{r_1 + r_2} \rho_M^{(2)} + \frac{r_{1(2)}^{(2)}}{r_1 + r_2} \rho_{M'}^{(2)} - \rho_0^{(3)} \right] \quad (3.25)$$

(\$d + a - z_0 < d + a\$).

6. Электрод \$M\$ расположен в пласте, \$O\$ и \$M'\$ - за пластом:

$$\rho_{\beta}^{(23)} = 1 + K^* \frac{\tau_{12}}{\tau_1 + \tau_2} \rho_M^{(23)} - \frac{\tau_{12}}{\tau_1 + \tau_2} \rho_{M'}^{(23)} + \rho_0^{(23)}$$

$$(x + \delta < x_0 < d + \delta + a).$$

7. Вся приемная линия находится в третьей среде:

$$\rho_{\beta}^{(23)} = 1 - K^* \frac{\tau_{12}}{\tau_1 + \tau_2} \rho_M^{(23)} + \frac{\tau_{12}}{\tau_1 + \tau_2} \rho_{M'}^{(23)} - \rho_0^{(23)}$$

$$d + \delta + a < x_0 < l.$$

В приведенных формулах

$$\rho_{MCO;M'}^{(n)} = \frac{1}{1 - \alpha_{MCO;M'}} + \frac{k_{12}}{2d - \alpha_{MCO;M'}} + A_{MCO;M'}^{(n)} - B_{MCO;M'}^{(n)}$$

$$\rho_{M'CO}^{(n)} = \frac{1}{1 - \alpha_{M'CO}} - \frac{1}{\alpha_{M'}} + k_{12} (A_{M'CO}^{(n)} - B_{M'CO}^{(n)})$$

$$\rho_{MCO;M'}^{(2)} = A_{MCO;M'}^{(2)} - B_{MCO;M'}^{(2)}$$

$$\rho_{MCO}^{(23)} = \frac{1}{1 - \alpha_{MCO}} - \frac{1}{\alpha_{M'CO}} + k_{12} (A_{MCO}^{(2)} - B_{MCO}^{(2)})$$

$$\rho_{MCO;M'}^{(33)} = \frac{1}{\alpha_{MCO;M'}} + \frac{k_{32}}{r^2(d + \delta) + \alpha_{MCO;M'}} - A_{MCO;M'}^{(3)} + B_{MCO;M'}^{(3)}$$

$A_M^{(n)}$ и $B_M^{(n)}$ — коэффициенты, учитывающие влияние границ раздела сред в пунктах, указанных в нижних индексах при расположении питающих электродов в средах, обозначенных верхними индексами

$$A_{MCO;M'}^{(n)} = (1 - k_{12}^2) k_{23} \sum_{n=0}^{\infty} \frac{(k_{21} k_{23})^n}{2(n+1)\delta + 2d - \alpha_{MCO;M'}}$$

$$A_{MCO;M'}^{(2)} = (1 - k_{12}^2) \left[\sum_{n=0}^{\infty} \frac{(k_{21} k_{23})^n}{2n\delta + \alpha_{MCO;M'}} + k_{23} \sum_{n=0}^{\infty} \frac{(k_{21} k_{23})^n}{2(n+1)\delta + 2d - \alpha_{MCO;M'}} \right]$$

$$A_{MCO;M'}^{(3)} = (1 - k_{12}^2)(1 - k_{23}^2) \sum_{n=0}^{\infty} \frac{(k_{21} k_{23})^n}{2n\delta + \alpha_{MCO;M'}}$$

$$B_{MCO;M'}^{(3)} = (1 + k_{12}^2)(1 - k_{23}^2) \sum_{n=0}^{\infty} \frac{(k_{21} k_{23})^n}{2n\delta + \alpha_{MCO;M'}}$$

$$B_{MCO;M'}^{(32)} = (1 + k_{12}^2) \left[\sum_{n=0}^{\infty} \frac{(k_{21} k_{23})^n}{2n\delta + 1 - \alpha_{MCO;M'}} + k_{21} \sum_{n=0}^{\infty} \frac{(k_{21} k_{23})^n}{2n\delta + 1 - 2d + \alpha_{MCO;M'}} \right]$$

$$B_{MCO;M'}^{(33)} = (1 + k_{12}^2) k_{21} \sum_{n=0}^{\infty} \frac{(k_{21} k_{23})^n}{2n\delta + 1 - 2d + \alpha_{MCO;M'}}$$

$k_{12} = \frac{\rho_2 - \rho_1}{\rho_1 + \rho_2}$ — коэффициент отражения от границ раздела сред ρ_1, ρ_2 . Остальные величины сохраняют прежние обозначения, а линейные размеры также выражены в долях размера установки ($AB = l = 1$). Выражения для величин $B^{(31)}, B^{(32)}$ и $B^{(33)}$ можно получить соответственно $A^{(13)}, A^{(12)}$ и $A^{(11)}$, заменяя в них d на $1 - (d + \delta)$ и α на $1 - \alpha$.

Из формул (3.21) — (3.27) легко получить выражения ИС для установок срединного градиента и трехэлектродной АМН, графики которых для сопоставления рассчитывались нами параллельно с дивергентными (при $R_{MN} = R_{MM'}$). Полученные кривые представляют интерес сами по себе, и поэтому приведем их расчетные формулы для пяти возможных случаев расположения приемных электродов относительно границ раздела.

I. Приемные электроды М и N находятся в первой среде:

$$\rho_{AB}^{(n)} = 1 + K^* \frac{\tau_{12}}{\tau_1} \left[\rho_M^{(n)} - \rho_N^{(n)} \right], \quad (3.28)$$

$$\rho_A^{(n)} = 1 + K^* \left(\frac{k_{12}}{2d - \alpha_{AM}} - \frac{k_{12}}{2d - \alpha_{AN}} + A_M^{(n)} - A_N^{(n)} \right) \quad (3.28a)$$

$$(0 < x_0 \leq d - a).$$

2. Электрод М расположен в первой среде, а N - в шланге

$$\frac{\rho_{AB}^{(17)}}{\rho_1} = 1 + K_{AB}^* \left[\rho_M^{(17)} - \rho_N^{(17)} \right],$$

$$\frac{\rho_A^{(17)}}{\rho_1} = 1 + K_A^* \left(\frac{k_{12}}{2d - \alpha_{AM}} + \frac{1}{\epsilon_N} + A_M^{(17)} - \rho_N^{(17)} \right),$$

($d - a \leq \alpha_0 \leq d + a$).

3. Электроды М и N находятся в пласте:

$$\frac{\rho_{AB}^{(22)}}{\rho_1} = K_{AB}^* \left[(A_M^{12} - B_M^{22}) - (A_N^{12} - B_N^{22}) \right],$$

$$\frac{\rho_A^{(22)}}{\rho_3} = K_A^* (A_M^{12} - A_N^{12}),$$

($d + a \leq \alpha_0 \leq d + \delta - a$).

4. Электрод М расположен в пласте, N - в третьей среде:

$$\frac{\rho_{AB}^{(23)}}{\rho_3} = 1 + K_{AB}^* \left[\rho_M^{(23)} - \rho_N^{(23)} \right],$$

$$\frac{\rho_A^{(23)}}{\rho_3} = K_A^* (A_M^{13} - A_N^{13})$$

($d + \delta - a \leq \alpha_0 \leq d + \delta + a$).

5. Оба электрода М и N расположены в третьей среде на шланге

$$\frac{\rho_{AB}^{(33)}}{\rho_3} = 1 + K_{AB}^* \left[\rho_M^{(33)} - \rho_N^{(33)} \right],$$

$$\frac{\rho_A^{(33)}}{\rho_3} = K_A^* (A_M^{13} - A_N^{13})$$

($d + \delta + a \leq \alpha_0 < l$).

В формулах (3.28)–(3.32) $\rho_{AB}^{(12)}$ и $\rho_A^{(12)}$ - коэффициенты сопоставления установок $A \rightarrow MN \rightarrow B$ и $A \rightarrow MN$; вид установок указан внизу, а среды, в которых размещаются электроды, - в верхнем индексе).

$$K_{AB}^* = \frac{1}{\frac{1}{r_{AM}} - \frac{1}{r_{BM}} - \frac{1}{r_{AN}} + \frac{1}{r_{BN}}} = \frac{K_M}{2\epsilon},$$

$$K_A^* = \frac{r_{AM} r_{AN}}{r_{MN}} = \frac{K_A}{2\epsilon},$$

где K_{AB} и K_A - коэффициенты четырехэлектродной АМNB и трехэлектродной АМN установок соответственно. Равенства (3.28) - (3.32) применимы к профилированию методом срединного градиента, однако из них легко получить формулы для зондирования при любом расположении приемной линии относительно контакта, заменяя в левом выражении d на $d_0 + R$ и $\epsilon_{M(0;M)}$ на $R_{M(0;M)}$. Остальные величины сохраняют прежние обозначения.

Для предельных градиент-установок $A \rightarrow MN \rightarrow B (\rho_{AB}^0)$ и $A \rightarrow MN (\rho_A^0)$ расчетные формулы еще упрощаются и число их сокращается до трех, по количеству сред, в которых располагается приемная линия $MN \rightarrow B$.

1. Приемная линия располагается в первой среде:

$$\frac{\rho_{AB}^{(10)}}{\rho_1} = 1 - \frac{K_{AB}^E}{2\epsilon} \left[\frac{1}{(1 - \alpha_{10})^2} - \frac{k_{12}}{(2d - \alpha_{10})^2} - A_E^{11} + B_E^{21} \right], \quad (3.33)$$

$$\frac{\rho_A^{(10)}}{\rho_1} = 1 - \frac{K_A^E}{2\epsilon} \left[\frac{k_{12}}{(2d - \alpha_{10})^2} - A_E^{11} \right] \quad (3.33a)$$

($0 < \alpha_0 \leq d$).

2. Приемная линия находится в пласте:

$$\frac{\rho_{AB}^{(22)}}{\rho_1} = K_{AB}^* \frac{K_{AB}^E}{2\epsilon} (A_E^{12} - B_E^{22}), \quad (3.34)$$

$$\frac{\rho_A^{(22)}}{\rho_1} = K_A^* \frac{K_A^E}{2\epsilon} A_E^{12} \quad (3.34a)$$

($d \leq \alpha_0 \leq d + \delta$).

3. Приемная линия расположена в третьей среде:

$$\frac{\rho_A^{(3)}}{\rho_B} = 1 - \frac{k_{AB}}{2\alpha} \left[\frac{1}{\alpha_{10}^2} + \frac{k_{22}}{[1-2(d+\delta)+\alpha_{10}]^2} - A_E^{11} + B_E^{33} \right]$$

$$\frac{\rho_A^{(3)}}{\rho_B} = \alpha_{10}^2 A_E^{11} \quad (d+\delta \leq \alpha_{10} < 1)$$

Здесь $k = 2\alpha \frac{\alpha_{10}^2 (1-\alpha_{10}^2)}{\alpha_{10}^2 + (1-\alpha_{10}^2)}$ - коэффициент четырехэлектродной установки $A \rightarrow M_1 N \leftarrow B$, а A_E и B_E - производные по α функций, приводившихся ранее, которые будут иметь вид:

$$A_E^{11} = -(1-k_{12}^2) k_{23} \sum_{n=0}^{\infty} \frac{(k_{21} k_{23})^n}{[2(n+1)d + 2d - \alpha_{10}]^2}$$

$$A_E^{12} = (1+k_{12}) \left[\sum_{n=0}^{\infty} \frac{(k_{21} k_{23})^n}{(2nd + \alpha_{10})^2} - k_{23} \sum_{n=0}^{\infty} \frac{(k_{21} k_{23})^n}{[2(n+1)d + 2d - \alpha_{10}]^2} \right]$$

$$A_E^{13} = (1+k_{12})(1-k_{23}) \sum_{n=0}^{\infty} \frac{(k_{21} k_{23})^n}{(2nd + \alpha_{10})^2}$$

$$B_E^{11} = -(1+k_{12})(1+k_{23}) \sum_{n=0}^{\infty} \frac{(k_{21} k_{23})^n}{(2nd + 1 - \alpha_{10})^2}$$

$$B_E^{12} = -(1+k_{23}) \left[\sum_{n=0}^{\infty} \frac{(k_{21} k_{23})^n}{(2nd + 1 - \alpha_{10})^2} - k_{21} \sum_{n=0}^{\infty} \frac{(k_{21} k_{23})^n}{(2nd + 1 - 2d + \alpha_{10})^2} \right]$$

$$B_E^{13} = (1-k_{23}) k_{21} \sum_{n=0}^{\infty} \frac{(k_{21} k_{23})^n}{(2nd - 2d + 1 + \alpha_{10})^2}$$

Результаты расчетов по приведенным формулам, выполненные для ЗМ "Промінь-2", свидетельствуют о резком изменении КС при движении приемной линии контактов разных сред. Границы пласта и изменение сопротивления четко отмечаются максимумом прямых ($A \rightarrow M_1, O_1 \leftarrow B$) и минимумом обратных ($A \rightarrow M_2, O_2 \leftarrow B$) дивергентных установок вступлении приемных электродов в пласт (приемная линия движется от поверхности А к В), минимумами перелом и максимумами вторых - при выходе из него (рис. 18). Экстремальные точки графиков соответствуют пересечению контактов центральным электродом О приемной линии. Если пласт высокоомный, то как для прямых, так и для обратных установок

экстремумов изменяются по сравнению с низкоомным пластом, т.е. минимумы сменяются максимумами и наоборот.

- Кроме основных аномалий, за пределами пласта отмечаются небольшие дополнительные экстремумы и пересечение графиков прямых и обратных установок, вызванные переходом через границы пласта внутренних при вогнутости приемной линии в пласт и М - при выходе из него) экстремумов. После этого кривые КС обеих установок, взаимно сближаясь, стремятся к общим горизонтальным асимптотам, равным истинным сопротивлениям сред ρ_1 и ρ_3 . Значения последних, как показывают результаты расчетов, слабо влияют друг на друга, т.е. на аномалии по другую сторону пласта и определяют в основном характер кривых КС на своих границах с пластом. Это свидетельствует о том, что при небольших мощностях пласта, ограничивающие его плоскости которыми приближением можно рассматривать как самостоятельные локальные контакты. Вне всякого сомнения, что в качестве отдельных контактов будут выступать границы мощных пластов, которые в связи с этим нами не рассматривались.

На кривых ρ предельных градиентных установок границы пласта также отмечаются четкими ступенями кажущихся сопротивлений (рис. 19), которые в реальных условиях при конечных размерах приемных электродов превращаются в зоны резких изменений КС. Последние также зависят от соотношения истинных сопротивлений пласта и вмещающих сред, в целом менее четко, чем $\rho_{1:2}$ и $\rho_{2:1}$, отмечают его границы четкостью до размеров приемной линии MN. Амплитуда аномалий при этом также уменьшается в два-три раза по сравнению с дивергентными установками таких же размеров.

Подводя итоги краткого рассмотрения характерных особенностей графиков различных установок, следует отметить, что в целом повышенная разрешающая способность и локализация неоднородностей на кривых дивергентных установок, отмечавшиеся ранее на примере вертикальных контактов [22], полностью присущи и кривым над двумя границами пласта. Такая же повышенная дифференциация кривых КС дивергентных установок подтверждается результатом моделирования [22] и многочисленными данными полевых наблюдений в реальной геологической обстановке Предкарпатья.

Горизонтально-вертикальные контакты

В практике геофизических исследований при решении многих лого-помоковых, разведочных или других задач нередко встречаются сложные геологические условия, характеризующиеся заметными явлениями геоэлектрического разрыва в горизонтальном направлении. Этому представляет определенный интерес изучение идеализированно часто встречающихся в реальных геологических условиях случаев, когда верхний слой неоднородный и состоит из двух или нескольких пластов.

В соответствии с этим и известными решениями задач для точечного источника в горизонтально-неоднородных средах [1] при такой же горизонтально-неоднородный комплекс, состоящий из (разрез ГВК-I; одна граница раздела) или трех (разрез ГВК-II; две границы раздела) сред, подстилаемых изолирующим или проводящим основанием на глубине h (рис. 19 - 23).

Используя выражения для потенциала точечного источника на поверхности горизонтально-неоднородных сред [1], с учетом выражения (1.2) найдем формулы для определения кажущихся сопротивлений в ровных дивергентных установках в модификации профилирования ($A - \sigma_{211} M' - B$) и зондирования ($A - M_{112} \sigma_{211} M' - B$).

Горизонтально-вертикальный контакт
с одной вертикальной границей раздела (ГВК-I)

Рассмотрим профилирование двусторонними дивергентными установками $A - M_{112} \sigma_{211} M' - B$ над горизонтально-вертикальным контактом с одной вертикальной границей раздела, заключенной в пространстве между питающими электродами A и B (рис. 19).

Обозначим через d расстояние от электрода A , расположенного в среде ρ_1 , до контакта, а через $r_{AM}(\bar{0}; M)$, $r_{AM}(\bar{0}; M')$, $r_{BM}(\bar{0}; M)$, $r_{BM}(\bar{0}; M')$ - удаления приемных электродов от действительных (A, B) и фиктивных (A', B') источников, указанных в индексах, которые для него будем выражать в долях длины питающей линии $AB = L = 1$. Вводя, что последняя остается неподвижной, рассмотрим кажущиеся сопротивления для четырех возможных вариантов взаимного расположения электродов относительно контакта.

1. Приемная линия полностью располагается в первой среде:

$$\frac{\rho_{r_1, r_2, \dots, 1}^{(100)}}{\rho_1} = K^* \frac{1}{r_1 r_2 \dots 1} \left[\frac{r_1 r_2 \dots 1}{r_1 + r_2} \rho_M^{(10)} + \frac{r_1 r_2 \dots 1}{r_1 + r_2} \rho_{M'}^{(10)} - \rho_0^{(10)} \right] \quad (3.36)$$

($0 < x_0 < d - a$).

2. Электроды М и О находятся в первой среде, М' - во второй:

$$\frac{\rho_{r_1, r_2, \dots, 1}^{(102)}}{\rho_1} = K^* \frac{1}{r_1 r_2 \dots 1} \left[\frac{r_1 r_2 \dots 1}{r_1 + r_2} \rho_M^{(102)} + \frac{k_{12} r_1 r_2 \dots 1}{r_1 + r_2} \rho_{M'}^{(102)} - \rho_0^{(102)} \right] \quad (3.37)$$

($d - a < x_0 < d$).

3. Электрод М' расположен в первой среде, а О и М - во второй:

$$\frac{\rho_{r_1, r_2, \dots, 1}^{(103)}}{\rho_1} = K^* \frac{1}{r_1 r_2 \dots 1} \left[\frac{r_1 r_2 \dots 1}{r_1 + r_2} \rho_M^{(103)} + \frac{k_{12} r_1 r_2 \dots 1}{r_1 + r_2} \rho_{M'}^{(103)} - \rho_0^{(103)} \right] \quad (3.38)$$

($d < x_0 < d + a$).

4. Вся приемная линия находится во второй среде:

$$\frac{\rho_{r_1, r_2, \dots, 1}^{(104)}}{\rho_1} = K^* k_{12} \frac{1}{r_1 r_2 \dots 1} \left[\frac{r_1 r_2 \dots 1}{r_1 + r_2} \rho_M^{(104)} + \frac{r_1 r_2 \dots 1}{r_1 + r_2} \rho_{M'}^{(104)} - \rho_0^{(104)} \right] \quad (3.39)$$

($d + a < x_0 < 1$).

В приведенных формулах:

$$\rho_{MCO; M'Y}^{(10)} = \frac{\rho_{\Sigma AMCO; M'Y}}{\epsilon_{AMCO; M'Y}} + \frac{k_{12} \rho_{\Sigma AMCO; M'Y}}{\epsilon_{AMCO; M'Y}} - \frac{(1+k_{12}) \rho_{\Sigma BMCO; M'Y}}{\epsilon_{BMCO; M'Y}}$$

$$\rho_{MCO; M'Y}^{(102)} = \frac{(1+k_{12}) \rho_{\Sigma AMCO; M'Y}}{\epsilon_{AMCO; M'Y}} - \frac{\rho_{\Sigma AMCO; M'Y}}{\epsilon_{BMCO; M'Y}} + \frac{k_{12} \rho_{\Sigma BMCO; M'Y}}{\epsilon_{BMCO; M'Y}}$$

$$\epsilon_{AMCO; M'Y} = 2d - x_{AMCO; M'Y}$$

$$\epsilon_{BMCO; M'Y} = 1 - x_{AMCO; M'Y}$$

$$\epsilon_{\Sigma BMCO; M'Y} = 1 - 2d + x_{AMCO; M'Y}$$

$$\rho_y = 1 + 2 \sum_{m=1}^{\infty} \frac{y}{\sqrt{y^2 + 4\pi^2 h^2 m^2}}$$

где y может принимать значение любого индекса при ρ (x_{AM}

$x_{M'}$, x_{BM} или $x_{\Sigma M}$).

Фактически - это кажущиеся сопротивления, определяемые в горизонтальной двухслойной среде потенциал-установками, показанные в виде с учетом влияния действительных и фиктивных источников. Такие величины сохраняют прежние обозначения.

Из формул (3.36) - (3.39), как и в предыдущем параграфе, такие выражения для определения кажущихся сопротивлений осями $A-MN-B$ (ρ_{AB}) и $A-MN$ (ρ_A).

1. Приемная линия располагается в первой среде:

$$\frac{\rho_{AB}^{I(1)}}{\rho_1} = K_{AB}^* (\rho_M^{I(1)} - \rho_N^{I(1)}),$$

$$\frac{\rho_A^{I(1)}}{\rho_1} = K_A^* [\rho_{AM}^{I(1)} - \rho_{AN}^{I(1)}],$$

$$(0 < x_0 \leq d-a).$$

2. Электрод M расположен в первой среде, N - во второй:

$$\frac{\rho_{AB}^{I(2)}}{\rho_1} = K_{AB}^* (\rho_M^{I(1)} - K_{12} \rho_N^{I(2)}),$$

$$\frac{\rho_A^{I(2)}}{\rho_1} = K_A^* [\rho_{AM}^{I(1)} - K_{12} \rho_{AN}^{I(2)}],$$

$$(d-a \leq x_0 \leq d+a).$$

3. Приемная линия находится во второй среде:

$$\frac{\rho_{AB}^{I(2)}}{\rho_2} = K_{AB}^* (\rho_M^{I(1)} - \rho_N^{I(2)}),$$

$$\frac{\rho_A^{I(2)}}{\rho_2} = K_A^* [\rho_{AM}^{I(1)} - \rho_{AN}^{I(2)}],$$

$$(d+a \leq x_0 < l).$$

В этих формулах

$$\frac{\rho_{AMEN}^{I(1)}}{\rho_{AMEN}} = \frac{\rho_{AMEN}}{\rho_{AMEN}} + \frac{k_{12} \rho_{AMEN}}{x_{AMEN}},$$

$$\rho_{AMEN}^{I(2)} = \frac{(1+k_{12}) \rho_{AMEN}}{\rho_{AMEN}},$$

$$\rho_y = 1 + 2 \sum_{n=1}^{\infty} \frac{y}{\sqrt{y^2 + 4n^2 a^2}},$$

где y - произвольная величина, а остальные обозначения прежние.

Для предельных градиент-установок $A-MN-B$ (ρ_{AB}^E) и $A-MN$ (ρ_A^E) расчетные формулы для расположения приемной линии, центр которой удален от электрода A на расстояние x , в первой и второй средах будут иметь вид

$$\frac{\rho_{AB}^{IE(1)}}{\rho_1} = x^2 \rho^{IE(1)} = \rho_x^E - \frac{k_{12} x^2}{x_{AM}^2} \rho_{A'M}^E + \frac{(1+k_{12}) x^2}{x_{BN}^2} \rho_{B'M}^E, \quad (3.43)$$

$$\frac{\rho_A^{IE(1)}}{\rho_1} = \rho_x^E - \frac{k_{12} x^2}{x_{AM}^2} \rho_{A'M}^E, \quad (3.44)$$

$$(0 < x_0 \leq d).$$

$$\rho_{AB}^{IE(2)} = x^2 \rho^{IE(2)} = (1+k_{12}) \rho_x^E + \frac{x^2}{x_{AM}^2} \rho_{AM}^E + \frac{k_{12} x^2}{x_{BM}^2} \rho_{B'M}^E, \quad (3.45)$$

$$\frac{\rho_A^{IE(2)}}{\rho_2} = (1+k_{12}) \rho_x^E, \quad (3.46)$$

$$(d < x_0 < l).$$

Здесь $\rho_y^E = 1 + 2 \sum_{n=1}^{\infty} \frac{y}{\sqrt{y^2 + 4n^2 a^2}}$, где по-прежнему y - произвольная величина.

Для вертикальных электрических зондирования установками $A-MN$ формулы будут иметь подобную структуру. Однако, учитывая, что в процессе зондирования неподвижным остается его центр, удобно обозначить через a_0 расстояние его до контакта, а через $\lambda = AO = OB = \frac{AB}{2}$ - полуразность питающей линии.

Пусть приемная линия располагается в первой среде. Тогда
им два случая.

1. Вся установка располагается в первой среде:

$$\frac{\rho_{1,2(12)}^{(11)}}{\rho_1} = K_{12(12)}^* \left[\frac{r_{2(12)}}{r_1 + r_2} \rho_{R_M}^{(11)} + \frac{r_{1(12)}}{r_1 + r_2} \rho_{R_M}^{(11)} - \rho_{R_0}^{(11)} \right] \quad (3.35)$$

($a < R < d_0$).

2. Электрод В находится во второй среде, все остальные - в первой:

$$\frac{\rho_{1,2(12)}^{(11)}}{\rho_1} = K_{12(12)}^* \left[\frac{r_{2(12)}}{r_1 + r_2} \rho_{R_M}^{(11)} + \frac{r_{12} r_{1(12)}}{r_1 + r_2} \rho_{R_M}^{(11)} - \rho_{R_0}^{(11)} \right] \quad (3.36)$$

($d_0 < R < \infty$).

В этих формулах

$$K_{12(12)}^* = \frac{1}{\frac{r_{2(12)}}{r_1 + r_2} \left(\frac{1}{R_{AM}} - \frac{1}{R_{BM}} \right) + \frac{r_{1(12)}}{r_1 + r_2} \left(\frac{1}{R_{AM}} - \frac{1}{R_{BM}} \right)}$$

$$\rho_{R_{AM(0,M)}}^{(11)} = \frac{\rho_{AM(0,M)}}{R_{AM(0,M)}} \cdot \frac{R_{BM}}{R_{BM}} + \frac{k_{12} \rho (2d_0 + R_{AM(0,M)})}{2d_0 + R_{AM(0,M)}} - \frac{k_{12} \rho (2d_0 - R_{BM(0,M)})}{2d_0 - R_{BM(0,M)}}$$

$$\rho_{R_{BM(0,M)}}^{(11)} = \frac{\rho_{BM(0,M)}}{R_{BM(0,M)}} + \frac{k_{12} \rho (2d_0 + R_{AM(0,M)})}{2d_0 + R_{AM(0,M)}} - \frac{(1+k_{12}) \rho_{AM}}{R_{AM(0,M)}}$$

где по-прежнему

$$\rho_A = 1 + 2 \sum_{m=1}^{\infty} \frac{R}{\sqrt{R^2 + 4m^2 h^2}}$$

Расчитанные по формулам (3.36) - (3.39) кривые профиля
линия над разрезом ГВК-1 показаны на рис.19.

В области контакта, как и следовало ожидать, полученные кривые
имеют сходные черты с кривыми установок А-М₁О₁М'₁ - В
вертикальной границы. Контакт, когда $\rho_1 < \rho_2$, четко фиксируется
минимумом прямой (А-М₁О₁М'₁ - В) и максимумом обратной (А-
-М₂О₂М'₂ - В) установок.

При обратном соотношении сопротивлений контактирующих сред
($\rho_1 > \rho_2$) соответственно изменяется характер графиков; над кон-
тактом наблюдается максимум кривых КС прямой и минимум обратной ус-
тановки; при этом амплитуда аномалии намного (в три раза при рас-
положении контакта в центре линии АВ) превышает разницу между сопротив-
лениями контактирующих сред, так как минимумы экстремумов меньше
местного сопротивления низкоомной, а максимумы больше сопротивле-
ния высокоомной среды.

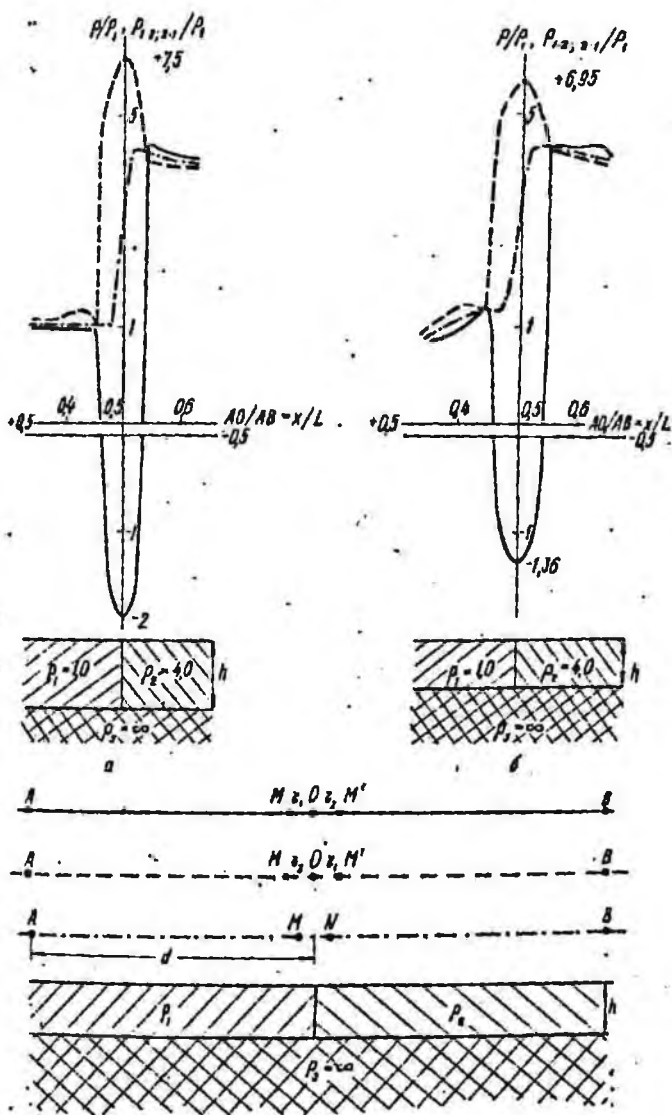


Рис. 19. Кривые КС двустороннего профилирования установками $A \rightarrow M, O, M' \leftarrow B$ над разрезом ГВР-I: $a - h = 10d$; $b - h = 0,5d$.

Следует отметить, что на графиках обычных ($A-MN-B$) у нас над контактом наблюдается лишь ступень, ширина которой определяется размерами приемной линии MN , а минимальные и максимальные значения соответствуют истинным сопротивлениям сред. Таким образом, над контактом ГВК-1, как и над вертикальными границами, наблюдаются аномалии на кривых КС дивергентных установок примерно в 2-3 раза больше, чем на графиках обычных установок, и соответственно большая способность выше.

За пределами контакта графики КС двусторонних установок сходятся и постепенно сходят (в случае $\rho_3 = \infty$) или возрастают (при $\rho_3 = 0$), стремясь к горизонтальным асимптотам, на уровне истинных сопротивлений сред ρ_1 и ρ_2 .

Кривые зондирования двусторонними установками ($A-Mr_{121}$ и $B-r_{121}$) над разрезом ГВК-1 (рис.20,21) во многом повторяют картину кривых ВЗЗ (установка $A-MN-B$) над такими же разрезами, считывая, что характер последних рассматривался в литературе [1]. Установившись здесь главным образом на отличиях кривых зондирования дивергентными установками (с центром в среде ρ_1) от кривых ВЗЗ в тех же пунктах. На всех кривых в виде излома отмечается переход в тающего электрода В через контакт, отчетливость которого прямо зависит от перепада сопротивлений на границе раздела сред ρ_1 и ρ_2 .

Над контактом наблюдается максимальное расхождение ветвей кривых КС прямых ($\rho_{1,2}$) и обратных ($\rho_{2,1}$) зондирований; при этом ниже располагаются $\rho_{1,2}$, если $\rho_1 < \rho_2$, и $\rho_{2,1}$ - если $\rho_1 > \rho_2$. По мере удаления в обе стороны от контакта величина расхождения кривых уменьшается, и они постепенно сливаются, приближаясь слева от контакта к истинному сопротивлению среды, в которой располагается приемная линия, а в правой конечной своей части стремятся к восходящей (при $\rho_3 = \infty$) или нисходящей (при $\rho_3 = 0$) наклонным асимптотам.

На абсолютную величину расхождения кривых двусторонних дивергентных зондирования, кроме сопротивлений сред ρ_1 и ρ_2 , оказывают влияние и размеры приемных линий, поэтому прямо связывать величину расхождения кривых с перепадом сопротивлений на контакте трудно. Тем не менее при постоянной величине приемной линии, что обычно в практике полевых наблюдений, величина расхождения кривых может служить критерием для относительной оценки дифференциации разрезов по сопротивлениям.

В случае, если центр зондирования расположен точно над вертикальной границей, расхождение кривых КС дивергентных установок

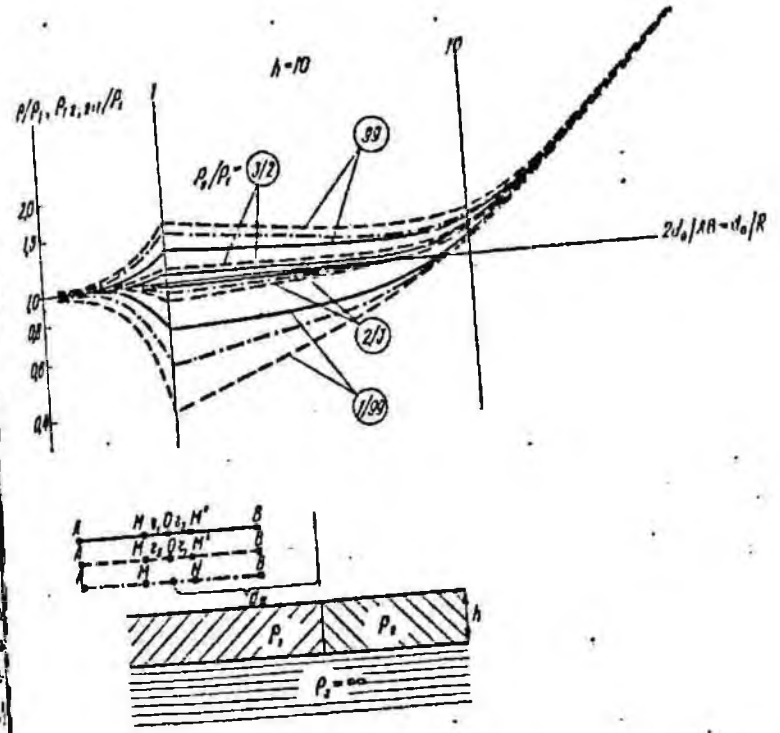


Рис.20. Кривые двусторонних дивергентных зондирований над разрезом ГВК-1 с изолятором в основании.

Величина расхождения кривых в области контакта достигает весьма ощутимых величин, составляющих 3($\rho_1 - \rho_2$), т.е. также втрое больше расхождения кривых двусторонних зондирования $A-MN$ и $MN-B$. Начальные ветви кривых ВЗЗ, расположенные на уровне истинных сопротивлений сред ρ_1 или ρ_2 соответственно, в этом частном случае представляет собой прямую линию, параллельную оси абсцисс с ординатой, зависящей от соотношения сопротивлений сред (ρ_1 и ρ_2) и определяемой выражением $\rho_1(1+k_{12})$.

Резкое увеличение дифференциации кривых двусторонних дивергентных зондирования по сравнению с обычными ВЗЗ подтверждается, как будет показано ниже, и результатами полевых наблюдений. В связи с этим усложнение моделей неоднородных разрезов и исследование характерных особенностей графиков дивергентных установок над ними не

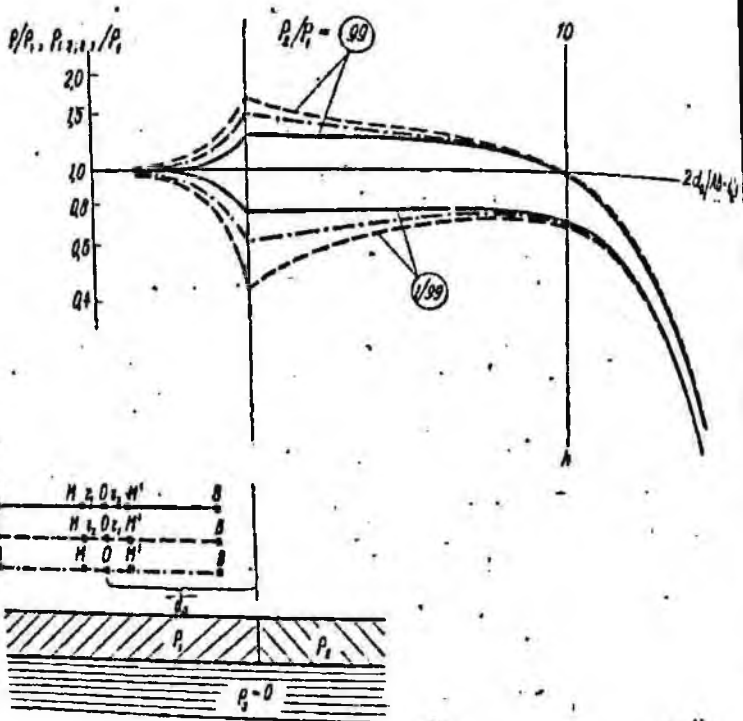


Рис. 21. Кривые двусторонних дивергентных зондирования над разрезом ГВК-I с проводником в основании.

только представляет теоретический интерес, а и оказывает непосредственную практическую помощь при истолковании полевых материалов.

Горизонтально-вертикальный контакт с двумя границами раздела (ГВК-II)

Расчетные формулы для этого вида неоднородности получим, используя выражения для кажущихся сопротивлений над вертикальным пластом (3.21) - (3.27) и дополнив их зеркальными отображениями действительного и фиктивных источников от горизонтальной границы раздела. Для профилирования установками А-МГ, АС, О, Д, С, М' - В такие же симметричные расположения питающей линии относительно М,

кажущих границ раздела, а остальные обозначения те же, что и для вертикального пласта. Соответственно здесь также возможны семь случаев различного расположения приемных электродов.

1. Приемная линия находится в среде ρ_1 , слева от пласта:

$$\frac{\rho_{1,2(2)}^{(1)}}{\rho_1} = K^* \frac{I(1)}{r_1 r_2} \left[\frac{r_2 r_1}{r_1 + r_2} \rho_M^{(1)} + \frac{r_1 r_2}{r_1 + r_2} \rho_{M'}^{(1)} - \rho_0^{(1)} \right] \quad (3.49)$$

$(0 < x_0 \leq d - a)$

2. Приемные электроды М и О находятся в первой среде, М' - во второй:

$$\frac{\rho_{1,2(2)}^{(1)}}{\rho_1} = K^* \frac{I(1)}{r_1 r_2} \left[\frac{r_2 r_1}{r_1 + r_2} \rho_M^{(1)} + \frac{r_1 r_2}{r_1 + r_2} \rho_{M'}^{(1)} - \rho_0^{(1)} \right] \quad (3.50)$$

$(d - a \leq x_0 \leq d)$

3. Электрод М расположен в первой среде, а О и М' - в пласте:

$$\frac{\rho_{1,2(2)}^{(1)}}{\rho_1} = K^* \frac{I(1)}{r_1 r_2} \left[\frac{r_2 r_1}{r_1 + r_2} \rho_M^{(1)} + \frac{r_1 r_2}{r_1 + r_2} \rho_{M'}^{(1)} - \rho_0^{(1)} \right] \quad (3.51)$$

$(d \leq x_0 \leq d + a)$

4. Вся приемная линия находится во второй среде:

$$\frac{\rho_{1,2(2)}^{(1)}}{\rho_1} = K^* \frac{I(1)}{r_1 r_2} \left[\frac{r_2 r_1}{r_1 + r_2} \rho_M^{(1)} + \frac{r_1 r_2}{r_1 + r_2} \rho_{M'}^{(1)} - \rho_0^{(1)} \right] \quad (3.52)$$

$(d + a \leq x_0 \leq d + d - a)$

5. Электроды М и О расположены в пласте, а М' - в третьей среде:

$$\frac{\rho_{1,2(2)}^{(1)}}{\rho_2} = K^* \frac{I(2)}{r_1 r_2} \left[\frac{r_2 r_1}{r_1 + r_2} \rho_M^{(2)} + \frac{r_1 r_2}{r_1 + r_2} \rho_{M'}^{(2)} - \rho_0^{(2)} \right] \quad (3.53)$$

$(d + d - a \leq x_0 \leq d + d)$

6. Электрод М находится во второй среде, О и М' - в третьей:

$$\frac{\rho_{1,2(2)}^{(1)}}{\rho_2} = K^* \frac{I(2)}{r_1 r_2} \left[\frac{r_2 r_1}{r_1 + r_2} \rho_M^{(2)} + \frac{r_1 r_2}{r_1 + r_2} \rho_{M'}^{(2)} - \rho_0^{(2)} \right] \quad (3.54)$$

$(d + d \leq x_0 \leq d + d + a)$

7. Прямая линия размещается в третьей среде:

$$\frac{\rho_3^{(2)}(z)}{\rho_3} = K \cdot \frac{\rho_1 \rho_2}{r_1 + r_2} \left[\frac{r_2 \rho_1}{r_1} \rho_M^{(3)} + \frac{r_1 \rho_2}{r_1 + r_2} \rho_{M'}^{(3)} - \rho_0^{(3)} \right] \cdot$$

$$(d + \delta + a \leq z_0 \leq 1).$$

В приведенных формулах:

$$\rho_{AM}(z, M') = \frac{\rho_{AM}(z, M')}{x_{AM}(z, M')} + \frac{k_{12} \rho_{A'M'}(z, M')}{x_{A'M'}(z, M')}$$

$$+ (1 - k_{12}^2) k_{23} \sum_{n=0}^{\infty} (k_{21} k_{23})^n \frac{\rho_{A_n M}(z, M')}{x_{A_n M}(z, M')}$$

$$- (1 - k_{32}) (1 - k_{21}) \sum_{n=0}^{\infty} (k_{21} k_{23})^n \frac{\rho_{B_n M}(z, M')}{x_{B_n M}(z, M')}.$$

$$\rho_{AM}(z, M') = (1 - k_{12}) \sum_{n=0}^{\infty} (k_{21} k_{23})^n \left[\frac{\rho_{A_n M}(z, M')}{x_{A_n M}(z, M')} + \frac{k_{23} \rho_{A_n' M'}(z, M')}{x_{A_n' M'}(z, M')} \right]$$

$$- (1 - k_{32}) \sum_{n=0}^{\infty} (k_{21} k_{23})^n \left[\frac{\rho_{B_n M}(z, M')}{x_{B_n M}(z, M')} + \frac{k_{21} \rho_{B_n' M'}(z, M')}{x_{B_n' M'}(z, M')} \right],$$

$$\rho_{AM}(z, M') = (1 - k_{12}) (1 - k_{23}) \sum_{n=0}^{\infty} (k_{21} k_{23})^n \frac{\rho_{A_n M}(z, M')}{x_{A_n M}(z, M')} \left[\frac{\rho(1-z)}{1-z} + \right.$$

$$\left. + \frac{k_{32} \rho_{B_n M}(z, M')}{x_{B_n M}(z, M')} + (1 - k_{32}) k_{21} \sum_{n=0}^{\infty} (k_{21} k_{23})^n \frac{\rho_{B_n' M'}(z, M')}{x_{B_n' M'}(z, M')} \right],$$

$$x_{AM}(z, M') = 2d - x_{AM}(z, M'),$$

$$x_{B'M'}(z, M') = 1 - 2(d + \delta) + x_{AM}(z, M')$$

$$x_{A_n M}(z, M') = 2nd + x_{AM}(z, M').$$

$$x_{B_n M}(z, M') = 2n\delta + 1 - x_{AM}(z, M')$$

$$x_{A_n' M'}(z, M') = 2(n+1)\delta + 2d - x_{AM}(z, M'), \quad x_{B_n' M'}(z, M') = 2n\delta + 1 - 2d + x_{AM}(z, M')$$

и по-прежнему

$$\rho_y = 1 + 2 \sum_{n=1}^{\infty} \frac{y}{\sqrt{y^2 + 4n^2 h^2}}$$

Легко убедиться, что величины x_{AM} , $x_{B,M}$ и $x_{B'M}$, представляющие собой расстояния фиктивных источников от электрода В, можно получить, заменяя расстояния от электрода А до ближней границы d и точки наблюдения x соответственно на $I-(d+\delta)$ и $I-x$. Формулы расчета кажущихся сопротивлений для обычных $A-MN-B$ и $A-MN$ установок несколько упрощаются и их можно записать для различных случаев.

1. Приемная линия MN' находится в среде ρ_1 :

$$\frac{\rho_{AB}^{I(1)}}{\rho_1} = K_{AB}^* (\rho_M^{I(1)} - \rho_N^{I(1)}), \quad (3.56)$$

$$\frac{\rho_A^{I(1)}}{\rho_1} = K_A^* (\rho_{AM}^{I(1)} - \rho_{AN}^{I(1)}), \quad (3.56a)$$

$$(0 < x_0 < d-a).$$

2. Электрод М расположен в первой, N - во второй среде:

$$\frac{\rho_{AB}^{I(2)}}{\rho_1} = K_{AB}^* (\rho_M^{I(1)} - K_{12} \rho_N^{I(2)}), \quad (3.57)$$

$$\frac{\rho_A^{I(2)}}{\rho_1} = K_A^* (\rho_{AM}^{I(1)} - K_{12} \rho_{AN}^{I(2)}), \quad (3.57a)$$

$$(d-a \leq x_0 < d+a).$$

3. Приемная линия - во второй среде:

$$\frac{\rho_{AB}^{I(22)}}{\rho_1} = K_{12} K_{AB}^* (\rho_M^{I(2)} - \rho_N^{I(2)}), \quad (3.58)$$

$$\frac{\rho_A^{I(22)}}{\rho_1} = K_{12} K_A^* (\rho_{AM}^{I(2)} - \rho_{AN}^{I(2)}), \quad (3.58a)$$

$$(d+a \leq x_0 < d+\delta-a).$$

4. Электрод М находится в пласте, N - в третьей среде:

$$\frac{\rho_{AB}^{(23)}}{\rho_2} = K_{AB}^* (\rho_M^{(2)} - \mu_{23} \rho_N^{(3)}),$$

$$\frac{\rho_{-A}^{(23)}}{\rho_2} = K_A^* (\rho_{AM}^{(2)} - \mu_{23} \rho_{AN}^{(3)}),$$

$$(d + \delta - a \leq x_0 < d + \delta + a).$$

• Приемная линия размещается в третьей среде:

$$\frac{\rho_{AB}^{(33)}}{\rho_3} = K_{AB}^* (\rho_M^{(3)} - \rho_N^{(3)}),$$

$$\frac{\rho_A^{(33)}}{\rho_3} = K_A^* (\rho_{AM}^{(3)} - \rho_{AN}^{(3)}),$$

$$(d + \delta + a \leq x_0 < l).$$

Здесь

$$\rho_{AMENJ}^{(1)} = \frac{\rho_{AMENJ}}{\varepsilon_{AMENJ}} + \frac{k_{12} \rho_{AMENJ}}{\varepsilon_{A'MENJ}} + k_{23} \sum_{n=0}^{\infty} (k_{21} k_{23})^n \frac{\rho_{A_n' MENJ}}{\varepsilon_{A_n' MENJ}}$$

$$\rho_{AMENJ}^{(2)} = (1 - k_{12}) \sum_{n=0}^{\infty} (k_{21} k_{23})^n \left[\frac{\rho_{AMENJ}}{\varepsilon_{AMENJ}} + \frac{k_{23} \rho_{A_n' MENJ}}{\varepsilon_{A_n' MENJ}} \right],$$

$$\rho_{AMENJ}^{(3)} = (1 - k_{12})(1 - k_{23}) \sum_{n=0}^{\infty} (k_{21} k_{23})^n \frac{\rho_{A_n' MGO; NJ}}{\varepsilon_{A_n' MGO; NJ}},$$

$$\rho_y = 1 + 2 \sum_{m=1}^{\infty} \frac{y}{\sqrt{y^2 + 4m^2 h^2}}.$$

Остальные величины уже встречались ранее и сохраняют прежние значения.

По аналогии с вертикальным пластом для градиент-установившегося поля электрода \dot{A} для каждой из сред будем иметь

$$\frac{\rho_{\dot{A}}^{(1)}}{\rho_1} = \alpha^2 \rho_{\dot{A}}^{(1)} = \rho_{x_0}^E - \frac{k_{12} \alpha^2 \rho^E (2d - x_0)}{2d - x_0} - (1 - k_{12}^2) k_{23} \sum_{n=0}^{\infty} (k_{21} k_{23})^n \frac{\rho_{\dot{A}'_n}}{\varepsilon_{\dot{A}'_n}} \quad (3)$$

$$(0 < x_0 \leq d);$$

$$\frac{\rho_A^{\tilde{z}(2)}}{\rho_2} = x^2 \rho_{AO}^{\tilde{z}(2)} + x^2 (1-k_{12}) \sum_{n=0}^{\infty} (k_{21} k_{23})^n \left[\frac{\rho_{AO}^{\tilde{z}(2)}}{x_{AO}} - \frac{k_{23} \rho_{AO}^{\tilde{z}(2)}}{x_{AO}'} \right] \quad (3.62)$$

($d < x < d + \delta$).

$$\frac{\rho_A^{\tilde{z}(3)}}{\rho_3} = x^2 (1-k_{12}) \sum_{n=0}^{\infty} (k_{21} k_{23})^n \frac{\rho_{AO}^{\tilde{z}(3)}}{x_{AO}} \quad (3.63)$$

($d + \delta < x_0 < 1$);

$$\rho_y^{\tilde{z}(3)} = 1 + 2 \sum_{n=1}^{\infty} \frac{y^3}{[y^2 + m^2(1/2)]^2}$$

где

Значения кажущихся сопротивлений для градиент-установки $A \rightarrow MN \leftarrow B$ можно получить как полусумму асимметричных установок AO и OB : $\rho_A = \frac{1}{2}(\rho_A + \rho_B)$. При этом значения КС для обратной установки OB можно получить по формулам (3.61) - (3.63), заменяя сопротивление среды ρ_1 на ρ_3 , в которой находится электрод В.

Для электрических зондирования с центром, расположенным в первой среде, возможны три случая.

1. Вся установка размещается в первой среде:

$$\frac{\rho_{12(2)11}}{\rho_1} = K^* \frac{\left[\frac{r_{1211}}{r_1 + r_2} \rho_{AM}^{\tilde{z}(1)} + \frac{r_{1221}}{r_1 + r_2} \rho_{AM}^{\tilde{z}(1)} - \rho_{AO}^{\tilde{z}(1)} \right]}{\quad} \quad (3.64)$$

($x < R < d_0$).

2. Питавший электрод В во второй среде, все остальные - в первой:

$$\frac{\rho_{12(2)11}}{\rho_1} = K^* \frac{\left[\frac{r_{2111}}{r_1 + r_2} \rho_{AM}^{\tilde{z}(2)} + \frac{r_{1221}}{r_1 + r_2} \rho_{AM}^{\tilde{z}(2)} - \rho_{AO}^{\tilde{z}(2)} \right]}{\quad} \quad (3.65)$$

($d_0 < R < d_0 + \delta$).

3. Питавший электрод В в третьей среде, а остальные в первой:

$$\frac{\rho_{12(2)11}}{\rho_1} = K^* \frac{\left[\frac{r_{2111}}{r_1 + r_2} \rho_{AM}^{\tilde{z}(3)} + \frac{r_{1221}}{r_1 + r_2} \rho_{AM}^{\tilde{z}(3)} - \rho_{AO}^{\tilde{z}(3)} \right]}{\quad} \quad (3.66)$$

($d_0 + \delta < R < \infty$).

В приведенных выражениях

$$\frac{\tilde{z}(n)}{\rho_{AM(0); M}} = \frac{\rho_{AM(0); M}}{x_{AM(0); M}} + \frac{k_{12} \rho_{AO}^{\tilde{z}(n); M}}{x_{AM(0); M}} + (1-k_{12}) k_{23} \sum_{n=0}^{\infty} (k_{21} k_{23})^n \frac{\rho_{AO}^{\tilde{z}(n); M}}{x_{AO}^{\tilde{z}(n); M}}$$

$$\left[\frac{\rho_{AMCO;M'}^2}{\epsilon_{BMCO;M'}} + \frac{k_{12} \rho_{\delta} \epsilon_{\delta'MCO;M'}}{\epsilon_{\delta'MCO;M'}} + (1-k_{12}) k_{23} \sum_{n=0}^{\infty} (k_{21} k_{23})^n \frac{\rho_{\delta'MCO;M'}}{\epsilon_{\delta'MCO;M'}} \right]$$

$$\rho_{AMCO;M'}^2 = \frac{\rho_{AMCO;M'}^2}{\epsilon_{AMCO;M'}} + \frac{k_{12} \rho_{\delta} \epsilon_{\delta'MCO;M'}}{\epsilon_{\delta'MCO;M'}} + (1-k_{12}^2) k_{23} \sum_{n=0}^{\infty} (k_{21} k_{23})^n \frac{\rho_{\delta'MCO;M'}}{\epsilon_{\delta'MCO;M'}}$$

$$-(1+k_{12}) \sum_{n=0}^{\infty} (k_{21} k_{23})^n \left[\frac{\rho_{\delta'MCO;M'}}{\epsilon_{\delta'MCO;M'}} + \frac{k_{23} \rho_{\delta} \epsilon_{\delta'MCO;M'}}{\epsilon_{\delta'MCO;M'}} \right]$$

$$\rho_{AMCO;M'}^2 = \frac{\rho_{AMCO;M'}^2}{\epsilon_{AMCO;M'}} + \frac{k_{12} \rho_{\delta} \epsilon_{\delta'MCO;M'}}{\epsilon_{\delta'MCO;M'}} + (1-k_{12}^2) k_{23} \sum_{n=0}^{\infty} (k_{21} k_{23})^n \frac{\rho_{\delta'MCO;M'}}{\epsilon_{\delta'MCO;M'}}$$

$$-(1+k_{12}) (1+k_{23}) \sum_{n=0}^{\infty} (k_{21} k_{23})^n \frac{\rho_{\delta'MCO;M'}}{\epsilon_{\delta'MCO;M'}}$$

$$\epsilon_{\delta'MCO;M'} = 2(d_0 + R) - R_{AMCO;M'} \quad \epsilon_{\delta'MCO;M'} = 1 - 2(d_0 + R_0) + R_{MEC;M'}$$

$$\epsilon_{\delta'MCO;M'} = 2\pi d + R_{AMCO;M'} \quad \epsilon_{\delta'MCO;M'} = 2\pi d + 1 - R_{MEC;M'}$$

$$\epsilon_{\delta'MCO;M'} = 2(\pi + 1)d + 2(d_0 + R) - R_{AMCO;M'} \quad \epsilon_{\delta'MCO;M'} = 2\pi d + 1 - 2(d_0 + R_0) + R_{MEC;M'}$$

$$\rho_R = 1 + 2 \sum_{m=1}^{\infty} \frac{R}{\sqrt{R^2 + 4m^2 h^2}}$$

Приведенные формулы позволили рассчитать графики профилирования (рис. 16) и кривые зондирования (рис. 22) над разрезом ГВК-П, Графики электропрофилеирования над двумя границами раздела, сглаженными изолятором или проводником, имеют много общего, как и случаи однопочного контакта, с графиками над вертикальным пластом, и практически совпадают с ними при мощностях верхнего слоя, значительно превышающих расстояние до питающего электрода ($h \gg 10d$).

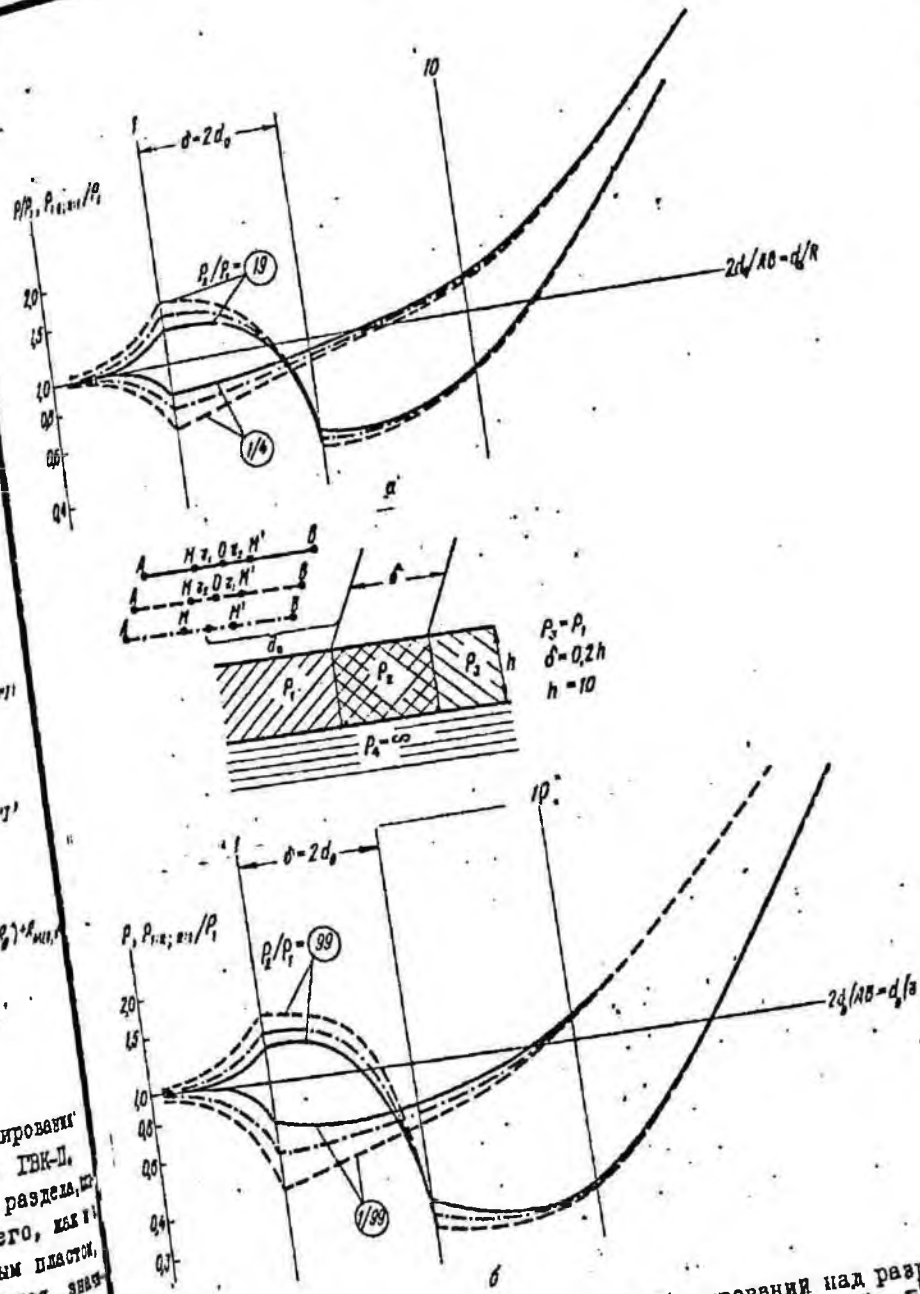


Рис. 22. Кривые двусторонних дивергентных зондирования над разрезом ГВК-П с изолятором в основании: а - $\rho_{12} = 19$ и $1/4$; б - $\rho_{12} = 99$ и $1/99$.

Точно так же при переходе приемной линии (движущаяся слева направо) из низкоомной среды в высокоомную контакт отмечается минимумом прямой и максимумом обратной на кривых КС двусторонних дивергентных установок, а при обратном соотношении сопротивлений экстремумы кривых меняют знак. За пределами пласта кривые $\rho_{1:2}$ и $\rho_{2:1}$ после пересечения и небольших ложных экстремумов стремятся к обе стороны от пласта к истинному сопротивлению вмещающих сред.

Подстилающая среда (как не имеющая горизонтальных неоднородностей) оказывает влияние только на амплитуду экстремумов и характер подхода кривой к истинным сопротивлениям вмещающих пласт сред, так как по мере приближения приемной линии к питающим электродам в месте среднего градиента уменьшается глубинность исследования, а значит, и влияние подстилающего основания.

Кривые зондирования над разрезом ГВК-II с расположением приемных линий в среде ρ_1 (рис. 22) также имеют много сходных черт с одноименными кривыми над разрезом ГВК-I. Пересечение каждой из вертикальных границ питающим электродом В так же отмечается изломами и расхождениями кривых КС прямых и обратных установок. При этом, если верхние три среды по мере удаления от центра зондирующей образуют разрез типа Н или К, т.е. изменяется характер контактов, пересекаемых электродом В, то по мере увеличения разросов (при $\rho_1 > \rho_2$, $\rho_3 < \rho_2$ или $\rho_1 < \rho_2$ и $\rho_2 > \rho_3$) кривые $\rho_{1:2}$ и $\rho_{2:1}$ в интервале между вертикальными контактами пересекаются и меняют взаимное расположение. Если же верхние три слоя отображают нарастающий (тип А- $\rho_1 < \rho_2 < \rho_3$) или уменьшение (тип А- $\rho_1 > \rho_2 > \rho_3$) сопротивления, то пересечения и относительной сменой расположения двусторонних кривых не наблюдается, в связи с чем контакт отмечается менее четко только изломами кривых. Во всех случаях кривые $\rho_{1:2}$ и $\rho_{2:1}$ располагаются по разные стороны от кривых ВЗЗ, сливаясь с ними в области малых и больших разросов или начальных и конечных ветвей, а также в точках пересечения.

Приведенные примеры, конечно, далеко не исчерпывают всех возможных случаев теоретического расчета (например, размещения приемной линии в среде ρ_2) и тем более реальных условий, однако они свидетельствуют о том, что сложные неоднородности зачастую можно представить как совокупность простых слагаемых. Это может оказаться полезным при истолковании полевых материалов в сложных разрезах, которые можно уподобить чередованию вертикальных или наклонных контактов, т.е. элементарных составных частей. Местоположение и характер

последних благодаря выполненным расчетам могут быть легко установлены на графиках как профилирования, так и зондирования дивергентными установками.

Наклонный контакт

Наклонные контакты широко распространены в реальных геологических разрезах. Поскольку же дивергентные установки особенно чувствительны к нарушениям горизонтальной однородности в разрезе, то рассмотрение этих контактов представляет практический интерес.

Для расчета теоретических кривых КС двусторонних дивергентных установок в этом случае исходным является выражение И.П.Скальской для потенциала точечного источника над наклонным контактом [27]. Кроме того, учитывая связь кривых КС обычных и дивергентных установок, последние можно получить также несложными приемами трансформации, пользуясь выражениями (1.31) - (1.32) и альбомом кривых, рассчитанных над наклонным контактом (палетки НК) [27].

Воспользовавшись теоретическими кривыми (рис.24-26), позаимствованными из работы [30], рассмотрим кратко характер и особенности кривых КС различных дивергентных установок над наклонным контактом. Последний на результатах электропрофилирования отмечается четким минимумом кривых КС прямой ($A-M_1, O_2 M \leftarrow B$) и максимумом обратной ($A-M_2, O_1 M \leftarrow B$) установок при пересечении контакта центральным приемным электродом.

По обе стороны от аномалии кривые КС стремятся к истинным сопротивлениям сред, расположенных в остром и тупом двугранных углах, но совершенно различным образом (рис.23). В первом случае наблюдается заметное, почти параллельное расхождение кривых $\rho_{1:2}$ и $\rho_{2:1}$ и пологий их спад или подъем по направлению к горизонтальной асимптоте, соответствующей истинному сопротивлению среды, расположенной в остром углу. Во втором случае кривые пересекаются на уровне сопротивления среды в тупом углу и после небольшого перегиба устремляются к нему уже с другой стороны. Величина экстремумов кривых двустороннего профилирования зависит от угла наклона плоскости контакта, размеров приемных линий и соотношения сопротивлений контактирующих сред.

При расположении контакта примерно посредине установки амплитуда аномалии закономерно уменьшается от максимальных значений при $\alpha = 90^\circ$ до нуля при $\alpha = 0^\circ$ и 180° . В этом случае оба графика сливаются и образуют прямую линию на уровне истинного сопротивления среды, слагающей разрез. Как и в случае вертикального контакта, ве-

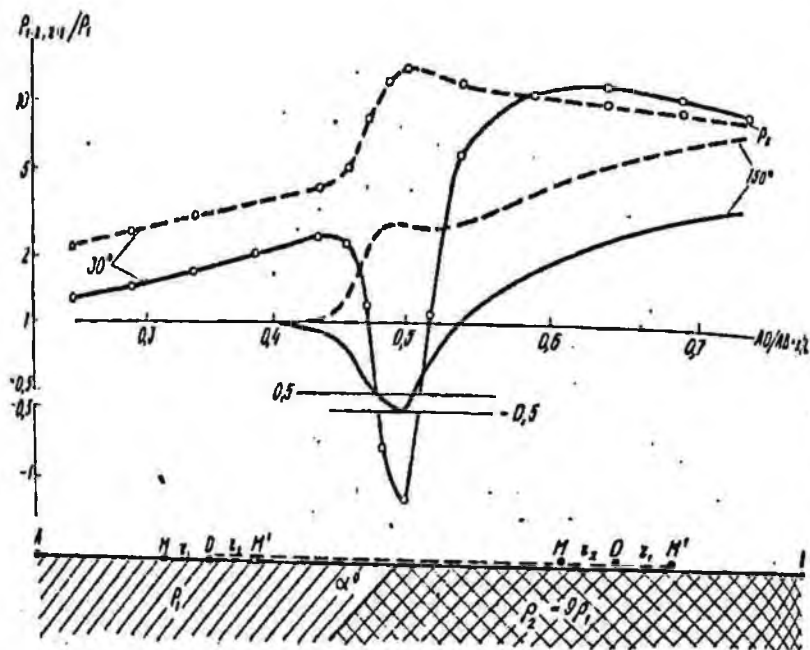


Рис. 23. Теоретические кривые электропрофилирования установками $A \rightarrow M_{1(2)} \rightarrow D_{1(2)} \rightarrow M' \leftarrow B$ над наклонным контактом.

Величина аномалии прямо пропорциональна размерам приемной линии. Амплитуда экстремумов растет с увеличением различия в сопротивлениях контактирующих сред, при этом интенсивность аномалии больше (при прочих равных условиях), если в остром углу располагается низкоомная среда.

Для двусторонних зондирований дивергентными установками ($A \rightarrow M_{1(2)} \rightarrow D_{1(2)} \rightarrow M' \leftarrow B$) в направлении, перпендикулярном к линии выхода наклонной границы на дневную поверхность (пусть для определенности электрод A располагается в среде ρ_1), наблюдается, как и над вертикальным контактом, закономерное расхождение кривых КС прямых и обратных установок с изломами при пересечении контакта одним из питающих электродов (рис. 24, 25).

Величина расхождения кривых зондирования также зависит от многих факторов: расположения относительно наклонной границы приемной

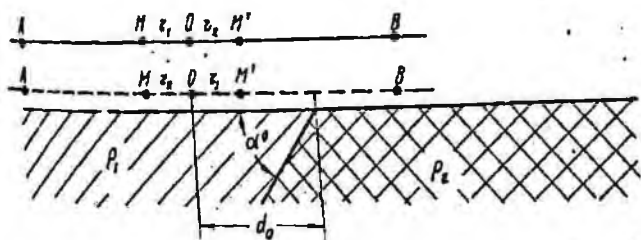
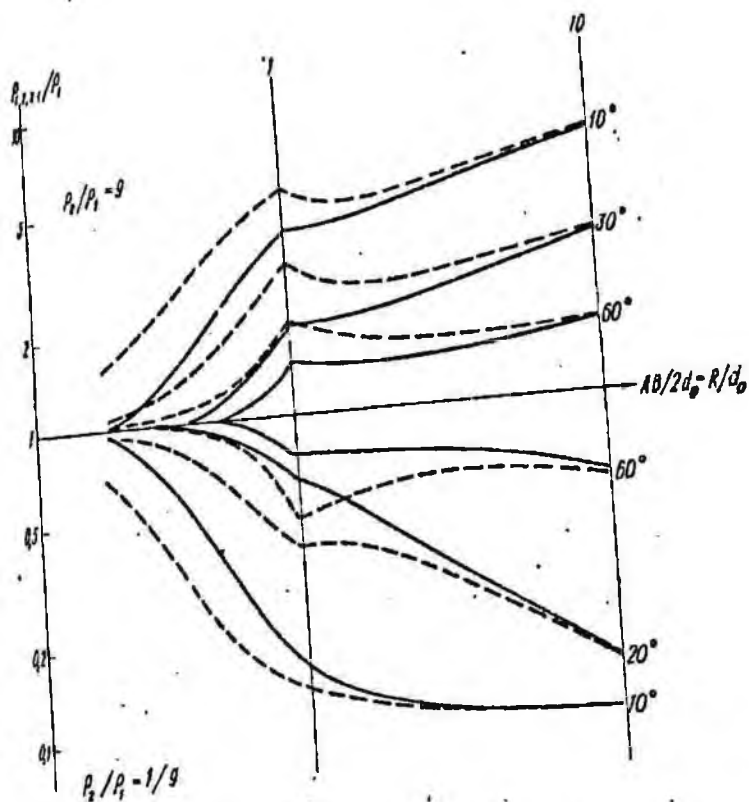


Рис. 24. Теоретические кривые двусторонних дивергентных зондирования над наклонным контактом ($\alpha < \frac{\pi}{2}$).

линии, ее размеров и удаления от контакта, угла наклона последнего, а также от соотношения сопротивлений контактирующих сред.

В соответствии с рассматривавшимся выше различием кривых электропрофилирования над средами в остром и тупом углах. результаты зондирования также резко различаются в зависимости от расположения приемных линий по отношению к контакту. Дифференциация кривых DC двусторонних зондирования, степень их расхождения и амплитуда сигнала заметно выше при размещении приемной линии над средой в ост-

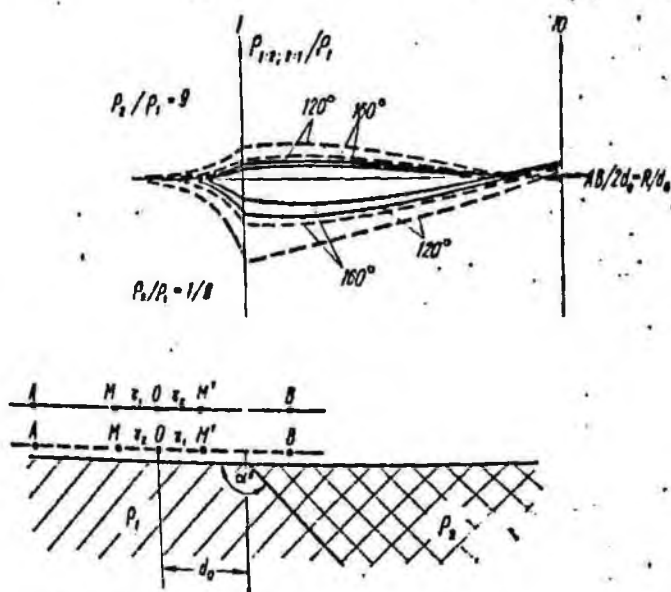


Рис. 25. Теоретические кривые двусторонних дивергентных зондирования над наклонным контактом ($\alpha > \frac{\pi}{2}$).

ром двугранном углу. В этом случае, представляющем непосредственный практический интерес при выборе центра зондирования в реальных условиях, выше располагаются кривые $P_2:1$ при $P_1 < P_2$ и $P_1:2$ при $P_1 < P_2'$ (рис. 25). Начальные ветви всех кривых стремятся к сопротивлению среды P_1 , а конечные - к P_2 ; в связи с чем кривые испытывают подъем, если $P_1 < P_2$ и спад - при $P_1 > P_2$.

Качественно сходны в левой части, но в значительной мере сглажены и облизаны двусторонние кривые, если $\alpha > 90^\circ$ и центр зондиро-

линия размещается над средой в тупом углу (рис. 25). Правые ветви кривых в этом случае, кроме отмеченных выше особенностей, отличаются и по характеру, так как подобно начальным стремятся к сопротивлению среды ρ_1 . При любом размещении центра зондирования относительно плоскости контакта (в остром или тупом двугранных углах) амплитуда аномалии выше, если центр установки располагается над высокопроводящей средой. Аналогично влияет и увеличение размеров приемной линии.

Величина расхождения двусторонних кривых обратно пропорциональна расстоянию центра зондирования от выхода наклонного контакта на поверхность и достигает максимальных значений в предельном случае, когда приемная линия расположена точно над контактом. Начальная часть кривых ($\frac{AB}{2d} < 1$) при этом исчезает, а остаются только правые ветви. Последние, сохраняя в основном описанные выше особенности конфигурации, отличаются тем, что при $\rho_1 < \rho_2$ и $\alpha < 90^\circ$ кривая $\rho_{1,2}$, а при $\alpha > 90^\circ$ кривая $\rho_{2,1}$ подобно графикам над вертикальным контактом переходят в область отрицательных значений. Очевидно, что если $\rho_1 > \rho_2$, то меняется взаимное расположение ветвей $\rho_{1,2}$ и $\rho_{2,1}$ и характер их конечной асимптоты (нисходящая вместо восходящей).

Зависимость амплитуды расхождения от угла наклона неодинакова во всех случаях и обусловлена взаимным расположением центра установки и линии пересечения плоскости контакта с дневной поверхностью. При их совпадении, как и для графиков профилирования, максимальное расхождение наблюдается при $\alpha = 90^\circ$ и сокращается до нуля при $\alpha = 0^\circ$ и 180° . Если центр зондирования смещается в сторону от контакта, амплитуда расхождения кривых достигает максимальных значений при углах $\alpha = 45^\circ$ и 135° (рис. 24, 25). Наконец, интенсивность расхождения кривых прямо пропорциональна различию в значениях сопротивлений контактирующих сред при сохранении неизменными всех остальных параметров.

Если двусторонние зондирования дивергентными установками проводятся параллельно линии выхода наклонного контакта, обе кривые $\rho_{1,2}$ и $\rho_{2,1}$ сливаются и идентичны кривым ВЗЗ [27].

Анализ особенностей кривых двусторонних дивергентных установок свидетельствует о повышенной их разрешающей способности по сравнению с кривыми обычных установок и преимуществах при картировании наклонных границ раздела, а также оценке элементов их залегания.

Локальные неоднородности

Варяду с вертикальными, наклонными и горизонтально-вертикальными протяженными границами раздела в реальных геологических условиях

нередко встречаются неоднородности, ограниченные по всем трем направлениям.

Влияние таких неоднородностей на результаты электроразведочных наблюдений рассмотрим на примере сферического включения, погруженного на некоторую глубину в полусферическую выемку, расположенную на дневной поверхности.

Погруженная сфера

Рассмотрим сферическое включение, расположенное в однородном полупространстве на некоторой глубине от дневной поверхности в поле дивергентных установок $A \rightarrow M(r_{1(2)}) \text{ от } r_{2(1)} \text{ } M' \leftarrow B$.

Пусть центр питающей линии АВ совпадает с проекцией сферы на дневную поверхность. Выражения для определяемых с помощью дивергентных установок сопротивления найдем, воспользовавшись решением для сферы в поле точечного источника [13]:

$$U_M^c = \frac{I\rho_1}{2\pi} \left[\frac{1}{r_{AM}} + \sum_{n=0}^{\infty} \rho_n \frac{d^{2n+1}}{d_A^{n+1} R_M^{n+1}} P_n(\cos\theta) \right] \quad (3.67)$$

Применяя принцип суперпозиции, выражение для КС дивергентных установок можно записать в следующем виде:

$$\frac{\rho_{r_{2(1)}}^c}{\rho_1} = 1 + K^* \left[\frac{r_{2(1)}}{r_1 + r_2} \rho_M^c + \frac{r_{1(2)}}{r_1 + r_2} \rho_{M'}^c - \rho_B^c \right] \quad (3.68)$$

Здесь ρ_M^c , $\rho_{M'}^c$ и ρ_B^c - множители, учитывающие влияние сферы (надеко "0") на приемные электроды и определяющиеся выражениями:

$$\rho_{M(r; M')}^c = \sum_{n=0}^{\infty} \rho_n \frac{d^{2n+1}}{d_{M(r; M')}^{n+1}} \left[\frac{1}{d_A^{n+1}} P_n(\cos\theta_A) - \frac{1}{d_B^{n+1}} P_n(\cos\theta_B) \right], \quad (3.69)$$

$$d_{A(B)} = \sqrt{(x_{MA(B)} \pm x_M)^2 + h^2},$$

$$R_{M(r; M')} = \sqrt{x_{M(r; M')}^2 + h^2}, \quad (3.70)$$

$$\cos\theta_{A(B)} = \frac{d_{A(B)}^2 + d_M^2 - x_{MA(B)}^2}{2d_{A(B)} \cdot d_M},$$

где d_A , d_B и $d_{M(r; M')}$ - расстояния от центра сферы до электродов, указанных в индексах; $x_{M(r; M')}$ - расстояния от приемных электродов

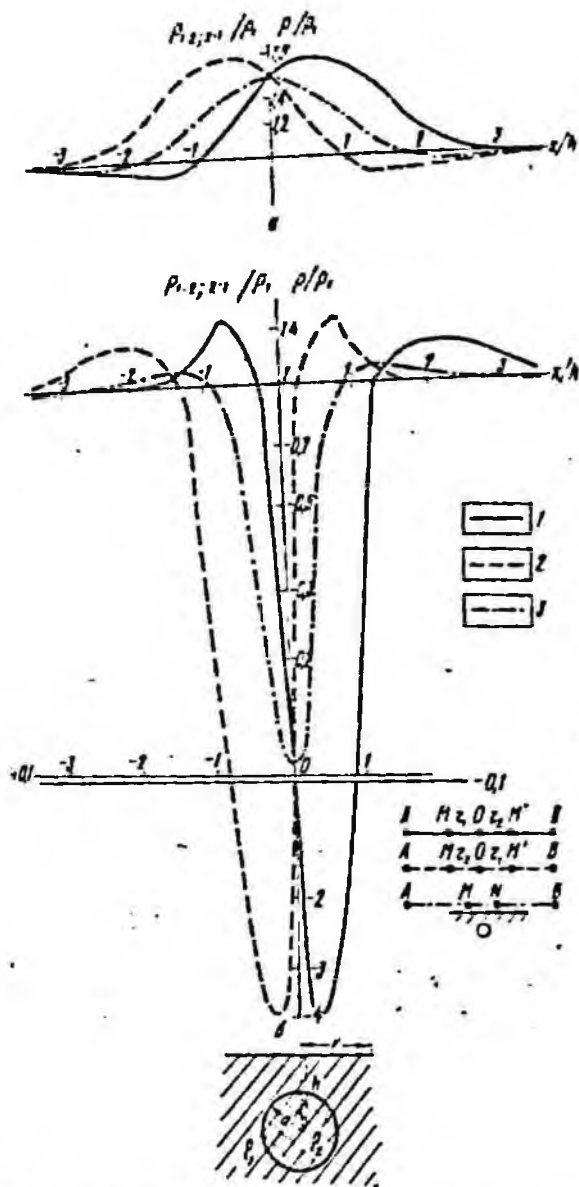


Рис. 26. Кривые профилирования известными устройствами А-В над погруженной стеной высокого (а) и низкого (б) сопротивления: а - $\rho_2 = 100$; б - $\rho_2 = 0$; 1 - $\rho_{1,2}$; 2 - $\rho_{2,1}$; 3 - ρ .

родов в обозначенных индексах до проекции центра сферы на дневную поверхность; a - радиус сферы; h - глубина залегания ее центра; $\rho_n = \frac{(\rho_2 - \rho_1)n}{\rho_1^n + \rho_2^{(n+1)}}$; ρ_1 и ρ_2 - удельные электрические сопротивления вмещающей среды и сферы, знак перед x_n в формуле (3.70) берется плюс, если питающий и приемный электроды располагаются по одну сторону от центра сферы, и минус, если по разные стороны. Остальные величины сохраняют прежние обозначения, и линейные размеры также выражаются в долях разности электродов АВ, принятого за единицу.

Рассчитанные по формуле (3.68) кривые КС дивергентных установок над погруженной сферой пониженного и высокого сопротивления (рис.26) имеют много общего с кривыми над вертикальным пластом одинакового со сферой сопротивления. В обоих случаях над центром сферы наблюдается пересечение кривых КС двусторонних установок, а слева и справа от него располагаются отчетливые экстремумы кривых $\rho_{1,2}$ и $\rho_{2,1}$; при этом над низкоомной сферой слева от ее центра располагаются максимум $\rho_{1,2}$ и минимум $\rho_{2,1}$, а справа - экстремумы с противоположными знаками.

В случае высокоомной сферы общая картина остается сходной, но графики КС прямой и обратной установок заметно сглаживаются и как бы меняются местами.

Вследствие локальности включения и его погружения на глубину, что равносильно перекрытию неоднородности наносами, кривые КС над сферой в значительной мере сглажены по сравнению с такими же кривыми над пластом. В частности, резко очерченные над границами пласта экстремумы, равные по ширине размеру приемной линии, растягиваются и становятся пологими, а более или менее четко выраженная площадка в центральной части пласта на графиках прямых и обратных установок над сферой вырождается в простое их пересечение. Тем не менее последнее достаточно надежно отмечает положение центра сферического включения, а расстояние между экстремумами позволяет примерно оценить глубину его залегания и приблизительные контуры.

В то же время кривыми обычного срединного градиента, приведенными на тех же рисунках для сопоставления, локальные неоднородности фиксируются намного слабее в виде пологих минимумов (если $\rho_2 < \rho_1$) и максимумов (при $\rho_2 > \rho_1$) кажущихся сопротивлений.

Не меньший интерес представляют также электрические зондирования дивергентными установками над локальными включениями, результаты которых вдоль профиля, проходящего над центром сферы, показаны на рис.27. Характерно, что по соотношению кривых КС прямых и обрат-

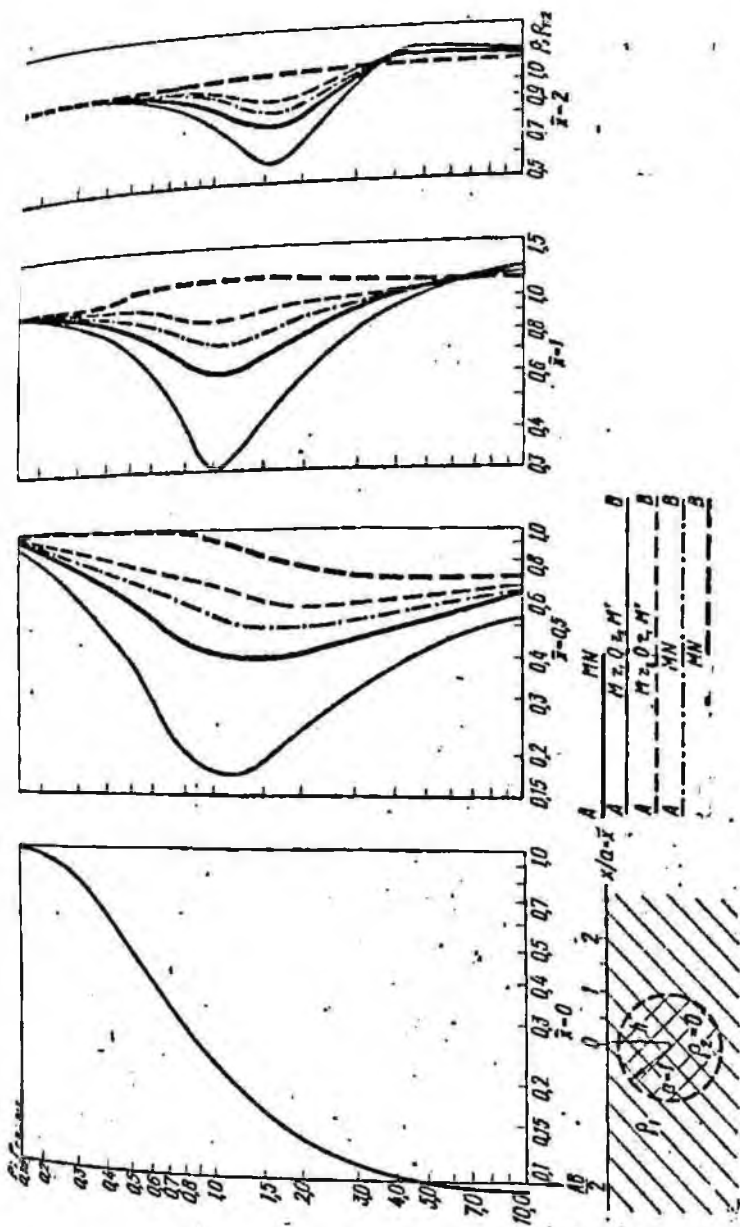


Рис. 27. Кривые зондирования дивергентной установками над погруженной проводящей сферой.

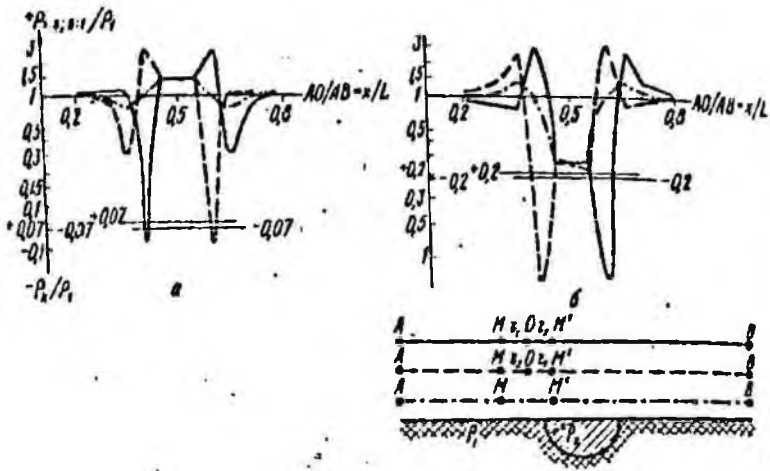


Рис. 28. Теоретические кривые электропрофилеирования установками $A-M-O-M'$ и $A-M-M'$ над полусферой повышенной (а) и пониженной (б) сопротивляемости.

ных установок и в этом случае удается достаточно уверенно определить пространственное положение включения. Над центром сферической неоднородности, соответствующей области пересечения графиков профилирования, наблюдаются почти полное совпадение прямой и обратной кривых дивергентных установок, а примерные контуры сферы по аналогии с графиками профилирования отмечаются областями максимального расхождения кривых зондирования.

Сделать подобные заключения по обычным кривым ВЗЗ, как убедительно показал Г.П.Саковцев [18], довольно затруднительно, и только дополнительные построения в виде разрезов КС помогают установить местоположение локальных неоднородностей в сравнительно простых разрезах.

Таким образом, повышенная разрешающая способность и преимущества двусторонних дивергентных установок, показанные выше при исследовании горизонтально-неоднородных разрезов с плоскими границами раздела, полностью сохраняются и при изучении локальных включений. Это свидетельствует о несомненных перспективах их применения, в первую очередь в рудной геофизике при поисках проводящих тел, а также в ви-

изерло-геологических изысканиях при оконтуривании карстовых полостей и других низко- или высокоомных включений.

Полусферическая впадина

Общее решение для полусферической впадины можно получить как частный случай потенциала для сферы, положив $h=0$. В этом случае (правило для знаков сохраняется то же, что и в предыдущем случае), $R_{M'O} = R_{M'O}'' = R_{M'O}''$; $\cos \theta_{A'OB} = 1$ и полиномы Лежандра из формулы исчезают, так как каждый из них равняется единице ($P_n(1) = 1$) и на значение любого члена суммы они не влияют. С другой стороны, количество расчетных формул увеличивается, так как при пересечении профилем наблюдений центра полусферы в нее (рис. 28), а поэтому необходимо в качестве вспомогательной использовать еще одну исходную формулу для потенциала внутри сферы [19], которая в наших обозначениях будет иметь вид

$$U_M = \frac{I \rho_1}{2\pi} \left[\frac{1}{x_{AM}} + \sum_{n=0}^{\infty} \rho_n \frac{R_M^n}{a^{n+1}} \right]; \quad (3.71)$$

Пользуясь выражениями (3.68) и (3.71), запишем расчетные формулы для всех возможных случаев расположения питающих и приемных электродов относительно полусферической впадины, допуская, что размеры ее могут быть и меньше (поверхностная неоднородность), и больше (сигнальная) разностей питающей линии АВ, но всегда больше размеров приемной линии MM' .

1. Все электроды находятся во вмещающей среде ρ_1 перед полусферой:

$$\frac{U_{M'O}^{(1)}}{\rho_1} = 1 + K^* \left[\frac{r_2 r_1}{r_1 + r_2} \left[\rho_{AM}'' - \rho_{OM}'' \right] + \frac{r_1 r_2}{r_1 + r_2} \left[\rho_{AM}' - \rho_{OM}' \right] \left[\rho_{AO}'' - \rho_{BO}'' \right] \right]; \quad (3.72)$$

$$(\infty > x_0 \geq x_{BO} + a; \quad 0 < x_{BO} \leq x_0 - a).$$

2. Электроды А, М, О и M' расположены в среде с ρ_1 перед полусферой, а электрод В - внутри полусферы в среде с ρ_2 :

$$\frac{U_{M'O}^{(2)}}{\rho_1} = 1 + K^* \left[\frac{r_2 r_1}{r_1 + r_2} \left[\rho_{AM}'' - \rho_{OM}'' \right] + \frac{r_1 r_2}{r_1 + r_2} \left[\rho_{AM}' - \rho_{OM}' \right] \left[\rho_{AO}'' - \rho_{BO}'' \right] \right]; \quad (3.73)$$

$$(x_{BO} + a \geq x_0 \geq a + x_{OM}').$$

3. Электроды А, М и О находятся слева от полусферы, а М' и В - внутри ее:

$$\frac{\rho_{1122-11}}{\rho_1} = \mu K^* \left[\frac{r_{211}}{r_1 + r_2} (\rho_{AM}^{11} - \rho_{OM}^{11}) + \frac{r_{122}}{r_1 + r_2} (\rho_{AM'}^{12} - \rho_{BM'}^{22}) - (\rho_{AO}^{11} - \rho_{BO}^{21}) \right] \quad (3.74)$$

($a + x_{OM} \geq x_B \geq a$).

4. Электроды А и М расположены слева от полусферы, а О, М' и В - внутри ее:

$$\frac{\rho_{1122-11}}{\rho_1} = \mu K^* \left[\frac{r_{211}}{r_1 + r_2} (\rho_{AM}^{11} - \rho_{BM}^{11}) + \frac{r_{122}}{r_1 + r_2} (\rho_{AM'}^{12} - \rho_{BM'}^{22}) - (\rho_{AO}^{12} - \rho_{BO}^{22}) \right] \quad (3.75)$$

($a \geq x_B \geq a - x_{OM}$).

5. Электрод А находится слева от полусферы, а остальные электроды - внутри ее:

$$\frac{\rho_{1122-11}}{\rho_1} = \mu K^* \left[\frac{r_{211}}{r_1 + r_2} (\rho_{AM}^{11} - \rho_{BM}^{22}) + \frac{r_{122}}{r_1 + r_2} (\rho_{AM'}^{12} - \rho_{BM'}^{22}) - (\rho_{AO}^{12} - \rho_{BO}^{22}) \right] \quad (3.76)$$

($a - x_{MO} \geq x_B \geq 0$).

6. Вся установка располагается внутри полусферы:

$$\frac{\rho_{1122-11}}{\rho_1} = \mu \left\{ \mu K^* \left[\frac{r_{211}}{r_1 + r_2} (\rho_{AM}^{22} - \rho_{BM}^{22}) + \frac{r_{122}}{r_1 + r_2} (\rho_{AM'}^{22} - \rho_{BM'}^{22}) - (\rho_{AO}^{22} - \rho_{BO}^{22}) \right] \right\} \quad (3.77)$$

($x_{AB} < 2a$).

Перечисленные случаи охватывают все варианты расположения приемных и питающих электродов при перемещении установки из вмещающей среды в полусферу. Ясно, что при дальнейшем движении установки за пласт будут симметрично повторяться уже знакомые расположения. В дополнение рассмотрим еще четыре возможных случая (при условии, что $2a > x_{MM'}$) применительно к съемке средних вторых равностей потенциала, когда питающие электроды А и В находятся во вмещающей среде по разные стороны от полусферы, а приемные перемещаются. Поэтому будем рассматривать только смену расположения последних.

1. Приемная линия полностью располагается в среде ρ_1 перед полусферой:

$$\frac{\rho_{1122-11}}{\rho_1} = \mu K^* \left[\frac{r_{211}}{r_1 + r_2} (\rho_{AM}^{11} - \rho_{BM}^{11}) + \frac{r_{122}}{r_1 + r_2} (\rho_{AM'}^{11} - \rho_{BM'}^{11}) - (\rho_{AO}^{11} - \rho_{BO}^{11}) \right] \quad (3.78)$$

($x_B \geq a + x_{OM}$).

4. Электроды M и O находятся перед полусферой, а M' - внутри нее.

$$\frac{\rho_{M(O)}^{\pi}}{\rho_1} = K \sqrt{\frac{r_1 r_2}{r_1 + r_2}} (\rho_{AM}^{\pi} - \rho_{OM}^{\pi}) + \frac{r_1 r_2}{r_1 + r_2} (\rho_{AM'}^{\pi} - \rho_{OM'}^{\pi}) - (\rho_{AM}^{\pi} - \rho_{OM}^{\pi}) \quad (3.79)$$

$(x + z_{AM} > z_0 > z)$.

5. Электрод M расположен слева, а O и M' - внутри полусферы:

$$\frac{\rho_{M(O)}^{\pi}}{\rho_1} = K \sqrt{\frac{r_1 r_2}{r_1 + r_2}} (\rho_{AM}^{\pi} - \rho_{OM}^{\pi}) + \frac{r_1 r_2}{r_1 + r_2} (\rho_{AM'}^{\pi} - \rho_{OM'}^{\pi}) - (\rho_{AM}^{\pi} - \rho_{OM}^{\pi}) \quad (3.80)$$

$x > z_0 > x - z_{MO}$.

6. Вся приемная линия находится внутри полусферы:

$$\frac{\rho_{M(O)}^{\pi}}{\rho_1} = K \sqrt{\frac{r_1 r_2}{r_1 + r_2}} (\rho_{AM}^{\pi} - \rho_{OM}^{\pi}) + \frac{r_1 r_2}{r_1 + r_2} (\rho_{AM'}^{\pi} - \rho_{OM'}^{\pi}) - (\rho_{AM}^{\pi} - \rho_{OM}^{\pi}) \quad (3.81)$$

$(x - z_{MO} > z_0 > 0)$.

В приведенных формулах введены следующие обозначения:

$$\rho_{AM(O); M'}^{\pi} = \rho_{M(O); M'}^{\pi} = \sum_{n=0}^{\infty} \rho_n \frac{x^{2n+1}}{d_{A(B)}^{2n+1} x_{M(O); M'}^{2n+1}}; \quad \rho_{AM(O); M'}^{\pi} = \rho_{M(O); M'}^{\pi} = \sum_{n=0}^{\infty} \rho_n \frac{x_{M(O); M'}^{2n+1}}{d_{A(B)}^{2n+1}};$$

$$\rho_{AM(O); M'}^{\pi} = \rho_{M(O); M'}^{\pi} = \sum_{n=0}^{\infty} \rho_n \frac{d_{A(B)}^{2n+1}}{x_{M(O); M'}^{2n+1}}; \quad \rho_{AM(O); M'}^{\pi} = \rho_{M(O); M'}^{\pi} = \sum_{n=0}^{\infty} \rho_n \frac{d_{A(B)}^{2n+1}}{x_{M(O); M'}^{2n+1}};$$

$$\rho_{AM(O); M'}^{\pi} = \rho_{M(O); M'}^{\pi} = \sum_{n=0}^{\infty} \rho_n \frac{d_{A(B)}^{2n+1}}{x_{M(O); M'}^{2n+1}}; \quad \rho_n = \frac{(n+1)(\rho_1 - \rho_2)}{\rho_1 + (n+1)\rho_2}$$

Остальные величины сохраняют те же обозначения, а расстояния $x_{M(O); M'}$ как и прежде, берутся со знаком плюс, если приемные и питающие электроды расположены по одну сторону от центра полусферы, и со знаком минус - если по разные.

Как свидетельствуют расчеты на основании полученных формул кривые электропрофилеирования установками $A-Mr_{1(2)}Or_{2(1)}M'-B$ над полусферой низкого и повышенного сопротивлений по отношению к вмещающим породам (рис.28), сходство их с аналогичными графиками над низко- и высокоомными пластами становится еще большим, чем для сферы.

По внешнему виду нетрудно заключить, что краевые части полусферы лучше всего аппроксимируются наклонным контактом, образованным

двух поверхностей и плоскостью, касательной к сфере. В соответствии с этим аномалии электропрофиллирования над краевыми частями полусферы почти полностью идентичны аномалиям над круто падающим контактом, при равенстве сопротивлений пород в остром и тупом углах сопротивления сферы и вмещающей среды соответственно. Точно так же, кроме основных экстремумов над контактами полусферы, наблюдается за ее пределами пересечение графиков двусторонних установок и ложные экстремумы, интенсивность которых несколько больше, чем у пертикальных пластов, но в целом мала по сравнению с основными.

Над центральной частью полусферы в интервале, когда приемные электроды находятся внутри ее, выделяются площадки равных значений кажущихся сопротивлений. Положение последних зависит только от отношения сопротивления полусферы и вмещающей среды и определяется, как показано в [4], следующим выражением:

$$\frac{\rho}{\rho_1} = \frac{3\mu_{12}}{1 + 2\mu_{12}} \quad (3.82)$$

То же выражение будет справедливым и для дивергентных установок, кажущиеся сопротивления которых, как было показано в гл. I, совпадают с КС составляющих их обычных установок, если последние равны между собой. За пределами полусферы оба графика сливаются и выходят на горизонтальную асимптоту, равную истинному сопротивлению вмещающей среды.

Не меньший интерес представляет также влияние полусферического включения на характер кривых двусторонних зондирования дивергентными установками при различном взаимном их расположении и разных размерах питающих и приемных линий по сравнению с радиусом полусферы (рис. 29). Для этого достаточно рассмотреть основные варианты расположения центра зондирования внутри, на границе и за пределами полусферы при одинаковом увеличении разнесов питающих электродов. Если центры зондирования и полусферы ($x_0 = 0$) совмещены, установка располагается симметрично по отношению к неоднородности, и поэтому обе кривые дивергентных установок совпадают (рис. 29г). В начальной ветви кривых кажущиеся сопротивления равны истинному сопротивлению полусферы, а с увеличением разнесов они спадают (при $\rho_2 > \rho_1$) или возрастают (при $\rho_2 < \rho_1$), достигая при вогуплении питающих электродов на границы полусферы значения, определяемых из соотношения (3.82). Дальнейшее увеличение разнесов за пределы полусферы не оказывает влияния на значения КС и кривые приобретают вид прямых, параллельных оси абсцисс.

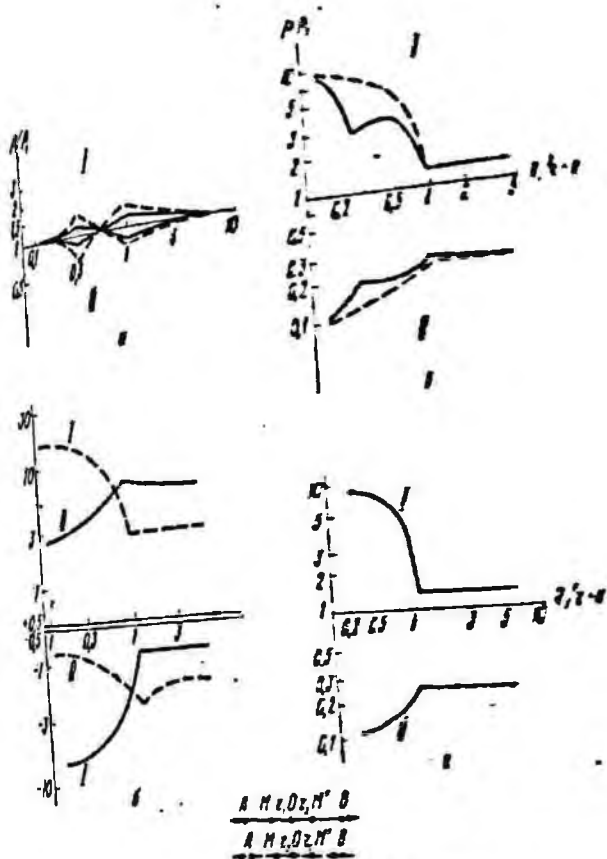


Рис.29. Теоретические кривые двусторонних дивергентных зондирований над полусферой повышенного (I) и пониженного (II) сопротивления: а - $r=2a$; б - $r=a$; в - $r=a/2$; 2 - $r=0$.

При смещении центра зондирования к границам полусферы, например, влево, прямая и обратная ветви кривых начинают расходиться с отклонением первой вниз при низкоомной или вверх - при высокоомной средах. На кривой появляется точка перегиба при пересече-

ним питающим электродом ближней границы. Обратные ветви при этом изменяются незначительно, а конечные их асимптоты при выходе питающих электродов за пределы полусферы остаются теми же. Абсолютная величина расхождений увеличивается по мере приближения центра зондирования к границе полусферы и в предельном случае над ней, когда одна из ветвей переходит в область отрицательных величин, достигает максимальных значений, близких к амплитуде аномалии над вертикальным контактом.

В случае смещения центра зондирования за пределы полусферы начальная и конечная их ветви сливаются и совпадают с истинным сопротивлением вмещающей среды. Наиболее заметное, хотя и не очень интенсивное, отклонение кривых от горизонтальной асимптоты и максимальное расхождение их ветвей наблюдается при пересечении питающим электродом границ полусферы. При этом в соответствии с характером графиков дивергентных установок над одиночными контактами (рис. 17, 22) аномалия имеет вид максимум - минимум, если полусфера высокого сопротивления, и обратный минимум - максимум, если она низкоомная. Во всех случаях интенсивность аномалии больше для ветви, теснее связанной с электродом, пересекающим контакт ($\rho_{1:2}$ для *A* и $\rho_{2:1}$ для *B*).

В результате исследования локальных неоднородностей можно сделать несколько общих выводов.

В первую очередь, приведенный анализ свидетельствует о том, что локальные неоднородности, как и для обычных установок [13], оказывают заметное влияние на результаты как профилирования, так и зондирования дивергентными установками. Наибольшее отклонение кривых КС от сопротивления вмещающей среды наблюдается при расположении (для зондирования) или перемещении (для профилирования) приемных линий над границами полусферы и внутри нее. При этом проводящие включения оказываются более заметно, чем высокоомные, как и для обычных установок [31]; это следует также непосредственно из соотношения (3.62), которое при $\rho_2 \rightarrow 0$ также стремится к нулю, а при $\rho_2 \rightarrow \infty$ достигает значений лишь 1,5 ρ_1 .

Если приемная линия располагается за пределами полусферы или размеры линии больше ее диаметра, то влияние неоднородностей заметно ослабевает. Поэтому увеличение приемной линии следует рекомендовать, если неоднородность выступает в качестве помехи, которую надо устранять.

Сопоставляя кривые КС дивергентных и обычных установок, как и в предыдущих случаях, мы отмечаем их повышенную разрешающую способ-

... в следователно, и повдигне чувствителността и компаративна изборност, що имат разпространението както на рудни-нически фактор. Озвато, на сито изследване както на рудни-нически, разположени в дна частта на и в обемните с дна.

Наконец, следует изяснить условия, которые имеют место при разведке больших залежей (вашиль, шпильман), когда наклонены разнонап уставкою криволинейных залежей. В этих случаях на крутых возвышениях могут появиться уже малые возвышения более 45° (рис. 28), когда и типичные синтаксисы сдвигаются, что необходимо учитывать при интерпретации данных измерений.

§ 2. МЕТОД ЗАРЯЖЕННОГО ТЕЛА

Метод заряженного тела в обычных геофизических условиях излучения потенциала или его градиента, создаваемый на поверхности проводящих источников, заменяется в основном или скорее выражением в терминах с электронной или ионной проводимости. В соответствии с этим в методе заряженного тела выделяют два варианта: рудный и геологический, которые несколько отличаются как по условиям применения, так и по методике и технике измерения. Различия с обычными измерениями установки с одинаковым устройством можно использовать в обоих вариантах и поэтому кратко рассмотрим особенности их применения.

Оконтуривание рудных тел

Этот вариант метода используется для прослеживания границ проводящих рудных объектов, которые при геометрических формах могут быть в первом приближении аппроксимированы равномерно заряженным шаром или точечным, а при значительном преобладании своего размера над остальными - линейным проводником. Именно на этих простых источниках поля рассмотрим основные особенности графиков девиантных установок в методе заряженного тела, которые, судя по естественным электрическим полям, будут справедливы и для проводников более сложной формы.

Потенциал, создаваемый на дневной поверхности равномерно поляризованным шаром или эквивалентным ему точечным источником, залегавшим в однородной среде на глубине h , вдоль оси, проходящей через центр шара, будет [29, 32]:

$$U^{\text{ш}} = q \frac{1}{\sqrt{x^2 + h^2}} \quad (3.23)$$

где q - заряд; x - расстояние от центра шара до точки наблюдения; h - глубина залегания шара.

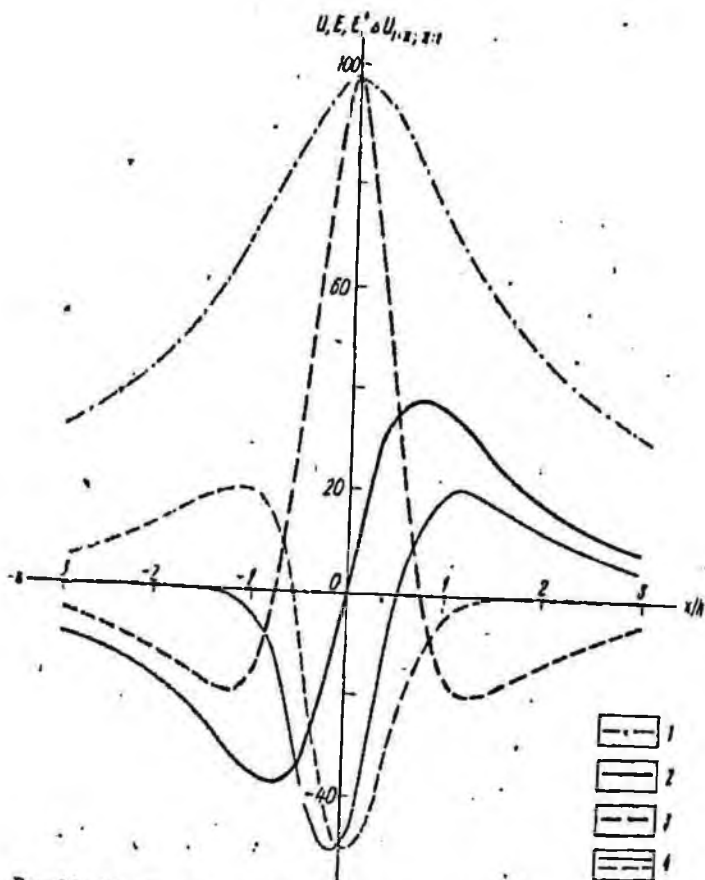


Рис. 30. Кривые потенциала (1), градиента (2), второй производной (3) и комбинации вторых разностей (4) (сплошная линия $\Delta U_{1;2}$; штриховая — $\Delta U_{2;1}$) над равномерно заряженным шаром (точечным источником).

Принимая выражения потенциала за исходные, легко найти формулы для напряженности поля (E), второй производной (E'); а также напряженности дивергентных установок ($E_{1;2}$ и $E_{2;1}$) вдоль оси x :

$$E = \frac{3q}{4} \frac{x}{(x^2 + h^2)^{3/2}}; \quad (3.84)$$

$$(E') = -\frac{3q}{4} \frac{h^2 - 2x^2}{(x^2 + h^2)^{5/2}}; \quad (3.85)$$

$$E_{1;2;2;1} = \frac{3q}{4} \frac{1}{3(x^2 + h^2)^{3/2}} \left[\pm x - \frac{3}{2} \frac{h^2 - 2x^2}{x^2 + h^2} \right]. \quad (3.86)$$

Как и в естественных полях верхний знак при x принимается для E_{112} , нижний - для E_{211} .
 Рассчитанные по формулам (3.83) - (3.86) кривые показаны на рис. 30. Кривые всех установок сходны с графиками над источниками естественных электрических полей, только в связи с переменной знака значения потенциала повернуты вокруг горизонтальной оси на 180° . Все графики более или менее отчетливо фиксируют местоположение заряженного тела экстремумами U , E_{112} , нулевыми значениями E_{211} или пересечением E_{112} и E_{211} , причем по пересечению кривых местоположение тела можно установить более точно, чем по экстремумам, особенно, если они пологие.

Нет принципиальных затруднения и в определении глубины залегания источника, хотя для этого на кривой потенциала необходимо кроме экстремальной иметь дополнительные точки, например, $0,71 U_{\max}$ [32].

На всех остальных кривых для этой цели можно воспользоваться расстоянием x_0 от начала координат (или эписцентра источника) до любого из периферийных экстремумов. Составив для исследования абсциссы экстремальных точек различных графиков производные выражения (3.84) - (3.86) и приравняв их нулю, находим $x_0^E \approx 4,71h$; $x_0^U \approx 1,1h$ и $x_0^{E_{211}} \approx 1,22h$. Таким образом, зная удаления экстремумов графиков градиента, дивергентных установок и второй производной от начала координат и умножая их на коэффициенты 1,41; 0,91 и 0,62, легко определить глубину залегания точечного источника.

Протяженные заряженные тела обычно можно уподобить линейному погруженному проводнику. Если последний параллелен оси y , то потенциал, создаваемый на дневной поверхности, будет иметь вид [32]:

$$U = \frac{q}{2l} \ln \frac{y+l+\sqrt{x^2+(y+l)^2+h^2}}{y-l+\sqrt{x^2+(y-l)^2+h^2}} \quad (3.87)$$

где x , y - координаты точки наблюдения, а q и l сохраняют прежние значения.

Из (3.87) легко определить и составляющие напряженности поля вдоль координатных осей

$$E_x = -\frac{\partial U}{\partial x} = q \frac{x}{(x^2+h^2)\sqrt{x^2+h^2+2l^2}} \quad (3.88)$$

$$E_y = -\frac{\partial U}{\partial y} = \frac{q}{2l} \left[\frac{1}{\sqrt{(y-l)^2+h^2}} - \frac{1}{\sqrt{(y+l)^2+h^2}} \right] \quad (3.89)$$

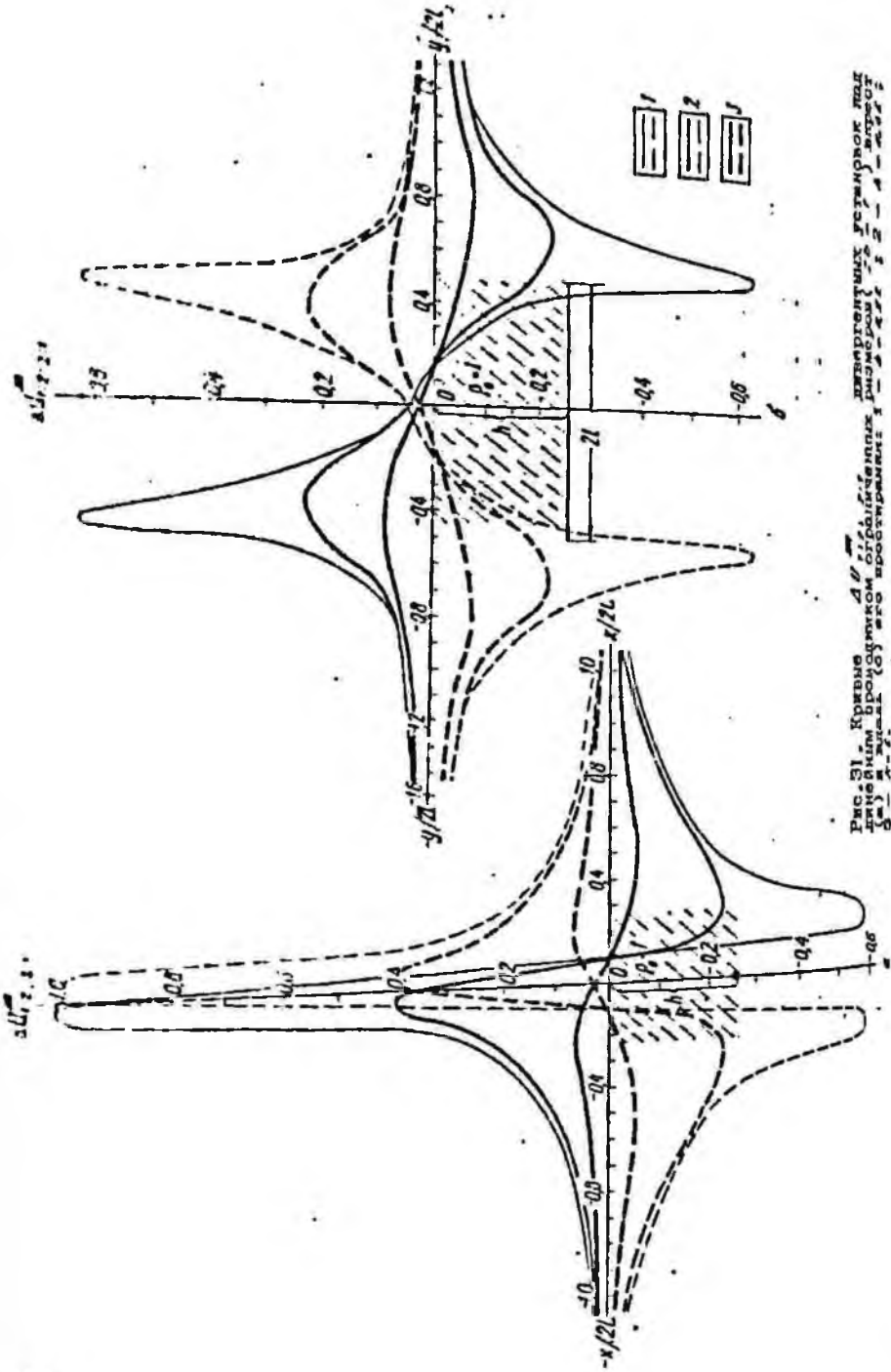


Рис. 31. Кривые δ от x/L для различных значений α при $\beta = 0.5$ (а) и $\beta = 0.2$ (б). Штриховка — область между кривыми 1 и 2.

Учитывая сложность исходных выражений (3.87) - (3.89), формулы для расчета предельных кривых $E_{1,2}$ и $E_{2,1}$ не определялись и окончательно-разностные их аналоги рассчитывались по составляющим напряженности, с помощью формул (2.24) - (2.25). Полученные таким образом кривые дивергентных установок, ориентированных вкрест и вдоль простирания линейного проводника, при различных глубинах его залегания показаны на рис. 31. Заметим, что для большего их сходства с аналогичными кривыми над естественно поляризованными телами они развернуты вокруг горизонтальной оси на 180° .

На кривых хорошо заметна тенденция удаления всех экстремумов (внутренних и периферийных) по мере увеличения глубины залегания проводника. При этом абсциссы точки их пересечения, соответствующие в зависимости от ориентации профиля наблюдений оси или середине проводника, не изменяются. Легко убедиться, что на профиле, перпендикулярном проводнику, в связи с конечной длиной последнего характер кривых $U_{1,2;2,1}$ весьма сходен с одноименными графиками над естественно поляризованными телами - тонким пластом и столбообразной залежью, а также над заряженным точечным источником. Принимая последний в качестве наиболее близкого аналога, глубину залегания линейного проводника можно с некоторым приближением определять так же, как и в предыдущем случае, т.е. как $0,91 x_0^A$, где x_0^A - поперечное расстояние от начала координат до любого из внешних экстремумов.

При ориентации профиля наблюдений вдоль проводника положение максимумов и минимумов характеризует в основном его линейные размеры и в меньшей степени глубину залегания. Концы проводника отмечаются более уверенно при малых глубинах его залегания и располагаются примерно посредине между разноименными экстремумами. Та же закономерность сохраняется и по мере погружения заряженного проводника, хотя оба экстремума заметно сглаживаются и удаляются друг от друга.

Таким образом, располагая результатами наблюдений над линейным проводником вкрест и вдоль его простирания, можно достаточно уверенно определять оба параметра (глубину залегания и горизонтальные размеры), представляющие интерес при исследованиях заряженных рудных тел.

Определение направления и скорости движения подземных вод

Сущность этого варианта метода заряженного тела состоит в изучении на дневной поверхности поля точечного заземления А, опущенно-

го в скважину на уровень водоносного горизонта до и после засолонения последнего.

Дивергентные установки здесь могут применяться в комплексе с обычными наблюдениями для локализации положения первоначального максимума потенциала и последующего прослеживания его смещения по течению определенных промежутков времени.

Поле электрода, опущенного в скважину на отметку водоносного горизонта, до засолонения определяется как потенциал точечного источника, рассматривавшийся выше. По мере движения подземных вод вместе с ними смещается засолоненная проводящая зона и соответственно максимум потенциала на дневной поверхности (рис. 32). Поэтому, снимая на поверхности земли через определенные промежутки времени эквипотенциальные линии, можно оценить направление и скорость движения потока.

Теоретически обосновать такие определения, как показано в [10], можно, допустив, что поле создается двумя источниками, расположенными в пункте заземления А и в центре проводящей зоны С (рис. 32). При условии, что вмещающая среда, в которую заключен водоносный горизонт, однородна суммарное поле на дневной поверхности в произвольной точке М на оси x , совпадающей с направлением движения потока, будет иметь вид [10]:

$$U_M = \frac{I\rho}{2\pi} \left[\frac{1-g}{\sqrt{x^2+h^2}} + \frac{g}{\sqrt{(x-x_M)^2+h^2}} \right] \quad (3.90)$$

где ρ — удельное электрическое сопротивление вмещающей пласт среды; g — коэффициент, указывающий, какая доля общего тока стекает в заземления С; h — глубина погружения электрода А.

Составляя для определения абсциссы максимума x_M равенство $\frac{\partial U_M}{\partial x} = 0$, приходим к выражению

$$\frac{(1-g)x_M}{(x_M^2+h^2)^{3/2}} - \frac{g(x-x_M)}{[(x-x_M)^2+h^2]^{3/2}} = 0, \quad (3.91)$$

которое при $g = 0,5$, т.е. когда токи, стекающие с электродов А и С, равны, имеет решением $x_M = l/2$, а при $g=1$, что означает высокую проводимость рассольной зоны и стекание всего тока в пункте С, — $x_M = l$. Отсюда, зная время t , за которое произошло смещение точки максимума, легко определить и скорость движения вод, которая, например, при введении в скважину рассола поваренной соли и $g=1$ определится как $V = x_M/l$.

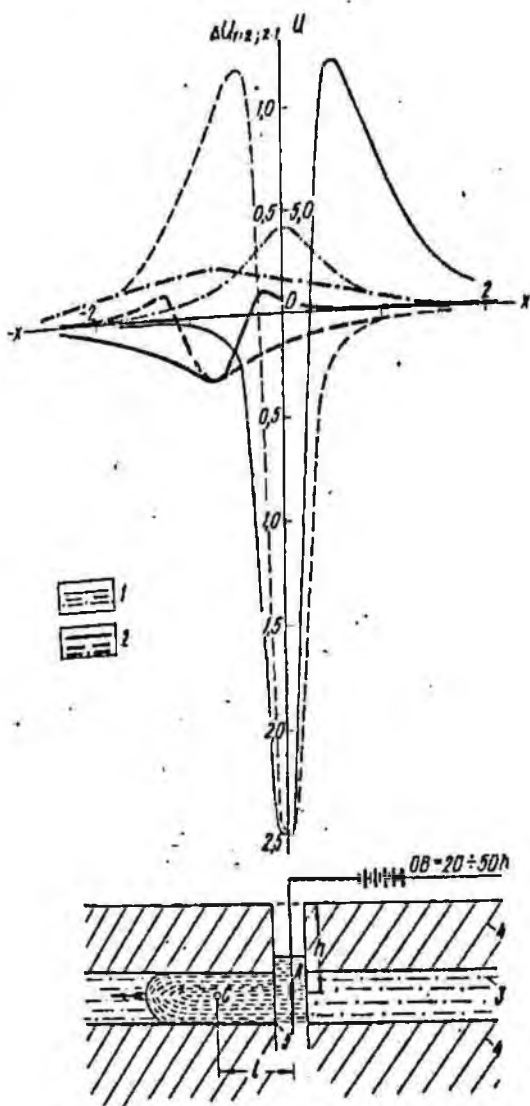


Рис. 32. Графики потенциала (U) и дивергентных установок над зарядом засоленного потока: 1 - привне $\Delta U_{1,2}$ (оплошная), $\Delta U_{2,1}$ (штриховая) и U (штрих-пунктирная) до насышки соли; 2 - то же после засоления; 3 - водоносный горизонт; 4 - вмещающие породы; 5 - проводящая зона (рассол).

Применение дивергентных установок для регистрации изменяющихся во времени полей заряженного потока на дневной поверхности совершенно не изменяет рассмотренных основ интерпретации метода, а, наоборот, позволяет более надежно их использовать. Как следует из рис. 32, благодаря четкому пересечению двусторонних кривых дивергентные установки позволяют достаточно уверенно фиксировать положение максимума потенциала, даже сильно сглаженного, по истечении значительного времени. Для подобных определений только самих графиков потенциала, как правило, недостаточно, и требуются специальные детализационные наблюдения [10].

МЕТОДИКА ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫХ ЛАБОРАТОРНЫХ
И ПОЛЕВЫХ НАБЛЮДЕНИЙ ДИВЕРГЕНТНЫМИ УСТАНОВКАМИ
И ИНТЕРПРЕТАЦИЯ ПОЛУЧАЕМЫХ МАТЕРИАЛОВ

Описанные теоретические исследования характера и особенностей кривых на дивергентных установках при наличии различных неоднородностей, хотя и используются на практике, тем не менее впадают в экспериментальной проверке основных положений и выводов, в первую очередь в лабораторных условиях.

Кроме подтверждения правильности теоретических положений, экспериментальные исследования позволяют изучать более сложные, но близкие к реальным условиям и важные для практики неоднородности, не поддающиеся математическим расчетам. В процессе экспериментов на моделях выясняются многие вопросы методики и техники, а также интерпретации результатов наблюдения, необходимые для заключительной проверки новых модификаций в реальных геологических условиях и внедрении их в практику.

§ 1. МЕТОДИКА И НЕКОТОРЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ МОДЕЛИРОВАНИЯ

Физическое моделирование — один из эффективных и широко распространенных способов изучения полей различных установок над сложными неоднородностями. Наиболее совершенным с точки зрения условий подобия является объемное моделирование в электролитических ваннах и ящиках с песком, глиной или другими материалами. Однако такие методы, как правило, громоздки и требуют стационарных лабораторных установок, в связи с чем получили широкое распространение более компактные способы двумерного моделирования на электропроводной бумаге [12] или в плоских электролитических ваннах [19].

Эти виды экспериментальных исследований также не лишены недостатков и имеют известные ограничения, связанные с возможностью моделирования только линейных установок, все электроды которых располагаются в одной вертикальной плоскости, а также с неоднородностями самой бумаги и полою смачивания различных ее сортов.

Несмотря на недостатки двумерные модели портативны и просты как в изготовлении, так и в проведении наблюдений, в связи с чем они и были выбраны нами для экспериментальной проверки теоретических предположений.

Благодаря повышенной разрешающей способности дивергентные установки более заметно реагируют и на упоминавшиеся неоднородности мо-

делит, вызванные несовершенством бумаги или склеив, в связи с чем некоторые, главным образом высокоомные, неоднородности моделировались в плоской электролитической ванне. Последняя по однородности вмещающей среды явного превосходит электропроводную бумагу и дает, сохраняя все особенности полуплоскости, результаты более близкие к теоретическим.

Коэффициенты установок для плоских моделей и полупространства естественно будут отличаться. Не останавливаясь на анализе этих отличия и коэффициентах дивергентных установок при $\tau_1 \neq \tau_2$, которые приводились в работе [22], запишем в общем виде выражение коэффициентов дивергентных установок $A - M_{1122} O_{2111} M^2 - B$ при разных величинах добавочных сопротивлений τ_1 и τ_2 для полуплоскости

$$K_{1122-11} = \frac{S}{\tau_1 + \tau_2} \ln \frac{\tau_{AM}}{\tau_{BM}} + \frac{\tau_{1122}}{\tau_1 + \tau_2} \ln \frac{\tau_{AM}}{\tau_{BM}} - \ln \frac{\tau_{AO}}{\tau_{BO}} \quad (4.1)$$

Используя коэффициенты, рассчитанные по этой формуле, можно вычислить кажущиеся сопротивления и строить графики КС обычными приемами. Методика и техника экспериментальных наблюдений дивергентными и обычными установками во многом сходны и поэтому остановимся только на их отличительных особенностях.

В качестве источника постоянного тока использовалась питающая часть электронинтегратора ЭГДА-9/67, а в качестве измерительного прибора - стрелочный компенсатор ЭСК-1 с высокоомным входом. В связи с высокими переходными сопротивлениями приемных электродов, которые изготавливались из медных штырьков, добавочные сопротивления τ_1 и τ_2 подбирались порядка нескольких десятков килоом для соблюдения условий, близких к расчетным. Для моделирования в плоской электролитической ванне с целью устранения возникающего при питании постоянным током эффекта поляризации электродов применялся знакопеременный ток от специального пульсатора, принцип действия которого сходный с обычным, во механические преобразования тока заменены релейными.

С помощью моделирования изучались в основном неоднородности по наносам, не имеющие пока теоретических решений задачи и расчетных данных. Наряду с этими выполнялись также наблюдения и над изученными разрезами типа вертикального и наклонного контактов, которые использовались в начальной стадии экспериментальных работ как критерий для оценки достоверности получаемых результатов в процессе отработки техники составления моделей и самого процесса наблюдений.

Во всех случаях для сопоставления и обнаружения случайных ошибок параллельно с дивергентными выполнялись наблюдения обычной лини-

Качественно сходный характер имеет графика и над наклонным контактом под высоко- и низкоомными наносами (рис.33 в,г). Несколько отчетливо выражены проявления в случае, когда в остром двустороннем углу располагается среда низкого сопротивления; при этом над высокоомной средой, как и на теоретических кривых, вместо плавного сближения наблюдается пересечение графиков и незначительные по амплитуде ложные экстремумы, являющиеся по существу единственными отличительными признаком наклонного контакта. Если же в остром двустороннем углу располагается высокоомная среда, то кривые КС отличаются от кривых над вертикальным контактом только амплитудой аномалии, т.е. признаком, который неуловим на практических кривых КС. Увеличение мощности наносов сокращает амплитуду аномалии и следовательно видоизменяет графики. Как показывает сопоставление кривых, полученных над наклонным контактом (в остром углу располагается низкоомная среда) при мощности высокоомных наносов $h=0,1; 0,07$ и $0,06$ АВ, сокращение последней в два раза вызывает увеличение амплитуды аномалии, определяемой по формуле (1.30), в 1,5 раза. Поскольку расхождение кривых КС прямой и обратной установок при $h=0,1$ АВ значительное, очевидно, для того чтобы зафиксировать наличие контакта достаточно, чтобы размеры линии АВ в несколько (четыре-пять раз) превышали мощность наносов. Таким образом, с помощью установок

$A-M_{(1)} O_{r_{(1)}} M'$ - местоположение вертикальных или наклонных границ под наносами устанавливается достаточно точно, но направление их наклона, особенно, если они крутопадающие, определить трудно, в в этом отношении дивергентные измерения в поле диполя имеют преимущества [22].

Описанные особенности двусторонних графиков над наклонными контактами сохраняются и над наклонным пластом (рис.34, в), представляющим собой сочетание двух наклонных границ с расположением в остром или тупом углу поочередно сред высокого и низкого сопротивления. Над центром пласта обе кривые пересекаются, что может служить достаточно надежным критерием определения центральной части пласта и в полевых условиях. Такой же простой и легко расширяваемый вид имеет графика над вертикальным пластом высокого и низкого сопротивления (рис.34, а, б). Центр пласта уверенно фиксируется пересечением кривых КС двусторонних установок, а четкими минимумами $\rho_{2,2}$ и максимумами $\rho_{2,7}$ или обратным их сочетанием отмечается соответственно левая (ближняя к электроду А) и правая границы высокоомного пласта.

Над пластом пониженного сопротивления кривые сохраняют такую же конфигурацию, но кривые КС, полученные прямой и обратной установками, меняются местами.

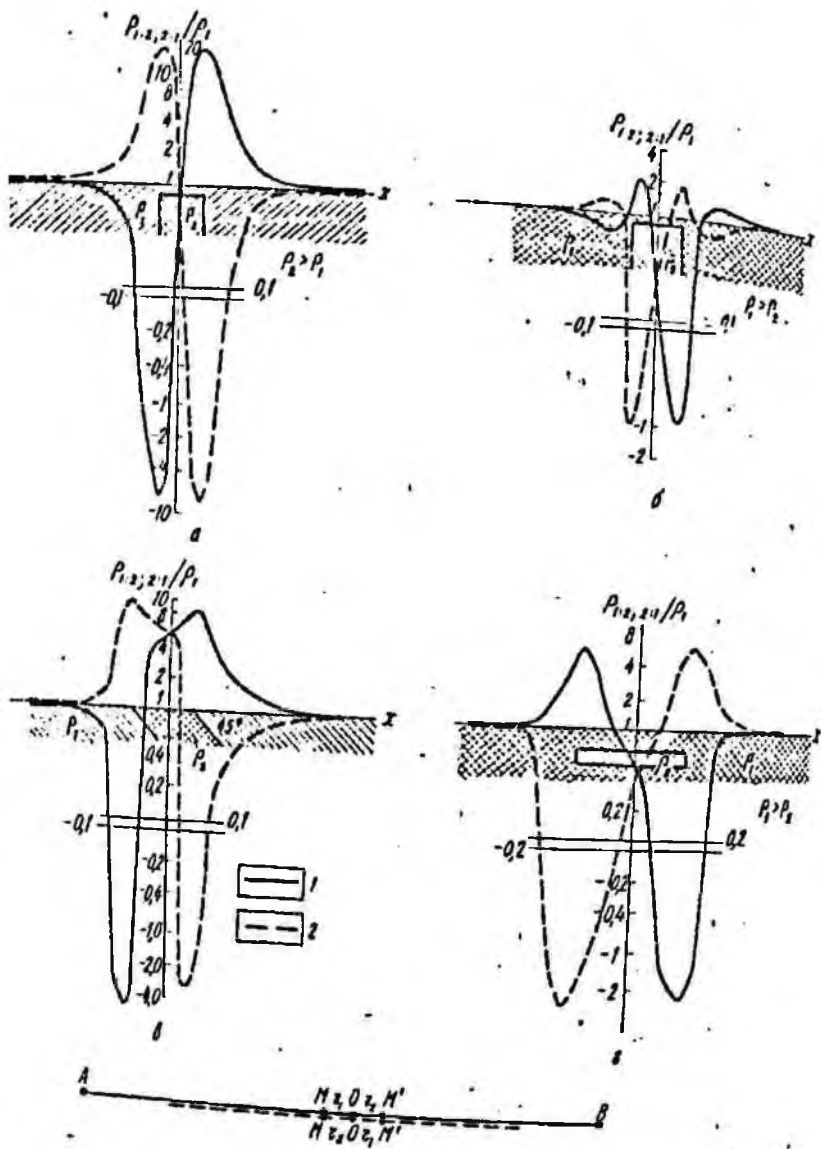


Рис. 34. Экспериментальные графики профилирования установками
 А — M_2, O_2, M' — В над вертикальным (а, б), на-
 клонным (в) пластинами в проводящем включении (г); 1 — $\rho_{1,2}$;
 2 — $\rho_{2,1}$.

Подобно низкоомному пласти ведёт себя проводящая пластина, расположенная на некоторой глубине в однородной среде (рис. 34в). Над центром пластины наблюдается четкое пересечение графиков, а по краям - экстремумы прямых и обратных установок.

Подводя итоги экспериментальных исследований различных особенностей код наносами, заметим, что в целом последние не влияют на характер, аномалий, а только на их интенсивность и четкость проявления экстремумов и других элементов. При всех прочих равных условиях истинность аномалий и дифференцированность графиков дивергентных установок выше, чем обычных, регистрируемых градиенты.

Особенно следует остановиться на экспериментальных исследованиях применительно к изучению разрезов нефтегазовых месторождений, выполнявшихся над моделями одно- и двухпластовой залежи, которая моделировалась полосами бесконечно высокого сопротивления, вырезанными в электропроводной бумаге, представлявшая собой однородную среду. Несмотря на то, что выбранные соотношения сопротивлений являются более контрастными, чем реальные, так как обычно по соотношениям нефтегазовые залежи отличаются от вмещающих пород всего в несколько раз, это вполне приемлемо для установления основных особенностей кривых КС различных установок, а также для сопоставления результатов скважинных и наземных наблюдений.

Экспериментальные наблюдения велись методом экранированного электрода с размещением поверхностного заземления над погруженным электродом (у устья скважины) и отнесением его на некоторое расстояние по профилю измерения, а для сравнения - поверхностными установками типа срединного градиента. При всех упомянутых вариантах расположения питающих электродов велась регистрация обычных градиентов ΔU и вторых разностей потенциала $\Delta U_{1;2}$ и $\Delta U_{2;1}$.

На первой модели в варианте метода погруженного электрода при расположении скважины в центре залежи от центра к периферии отмечается рост значений КС до контура залежи и затем плавный их спад до фоновых значений (рис. 35, а). Таким образом, края залежи отмечаются максимумом кажущихся сопротивлений. Такой характер кривых КС вполне закономерен. Поскольку наблюдаемые кривые в методе экранированного электрода по существу являются двумя ветвями кривой зондирования над изолятором, в левой ветви наблюдается рост кажущихся сопротивлений от истинных сопротивлений вмещающей среды до асимптоты, наклоненной под углом 45° , характерной для горизонтально залегавшего изолятора, который служит верхней границей залежи. За контурами последней высоко-

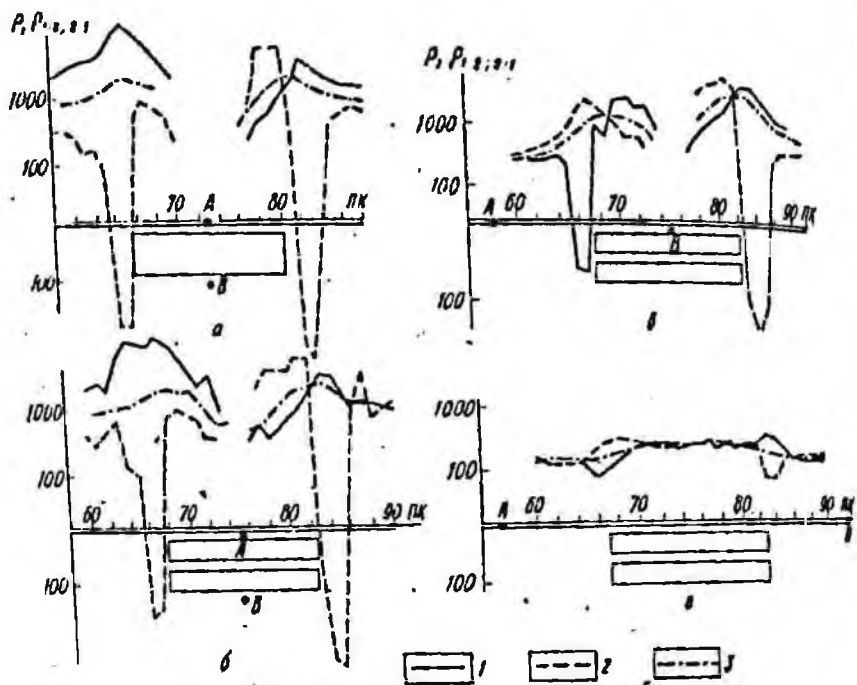


Рис. 35. Результаты исследований над моделями залежей: 1 - $\rho_{1:2}$; 2 - $\rho_{2:1}$; 3 - ρ .

косинный экран в разрезе отсутствует, и поэтому значения кажущихся сопротивлений начинают уменьшаться, стремясь к истинному сопротивлению вмещающих залежь пород.

Двусторонними дивергентными установками те же изменения разреза в горизонтальном направлении отмечаются намного четче; при переходе от вмещающих пород к модели залежи над контактом наблюдается резкий минимум кривой КС прямой и сравнительно пологий максимум кривой обратной дивергентных установок, а над противоположным краем кривые $\rho_{1:2}$ и $\rho_{2:1}$ меняются местами. В общем характер кривых такой же, как и над контактом под наносами, если учесть, что при наблюдениях по обе стороны от питающего заземления и сохранения одина-

ковой ориентации приемной линии $100M^1$ на профиле, кривые $\rho_{1:2}$ и $\rho_{2:1}$ слева и справа от заземления меняются местами. Такой же характер сохраняют кривые КС всех установок и над двухъярусной залежью (рис. 36-2). В связи с этим можно полагать, что многоярусная залежь при определении ее контуров будет себя вести как одно высокоомное впадение.

Особый интерес представляет случай, когда вся установка располагается на дневной поверхности, один электрод - за пределами залежи, а второй - в ее центре, у устья скважины.

Подобно предыдущему случаю максимумами кривых КС обычных и четкими экстремумами кривых двусторонних дивергентных установок фиксируются дальняя и ближняя кройки модели. Экстремумы по интенсивности немного уступают аномалиям о погруженным вторым электродом в скважину. Отсюда напрашивается логический вывод, что если не все, то по крайней мере некоторые задачи, связанные с прямыми поисками нефтегазовых залежей, можно решать наземными наблюдениями.

Характерно, что при наблюдениях методами съемки градиентов и вторых разностей потенциала с размещением края залежи примерно по середине интервала наблюдений результаты более четкие, чем при другой линии АВ, приблизительно втрое превышающей размеры залежи. В этом случае на графиках среднего градиента залежи отмечаются лишь незначительный максимум, а на кривых КС дивергентных установок по краям залежи наблюдаются относительно более четкие, но в целом так же малointенсивные экстремумы. Отсюда следует, что при наземных наблюдениях типа среднего градиента лучше всего полосу предполагаемого контура совмещать с центром питающей линии.

Над описанными моделями дополнительно исследовалась зависимость интенсивности аномалии от мощности перекрывающих залежь наносов и размеров приемной линии. Установлено, что амплитуда аномалии резко убывает с увеличением мощности наносов и менее интенсивно - по мере сокращения размеров приемных линий. Этим подтверждается вполне закономерный вывод о том, что чем меньше мощность перекрывающих залежь пород по сравнению с ее размерами, тем лучше результаты можно ожидать от применения метода экранированного электрода и наземных наблюдений.

В заключение рассмотрим результаты моделирования методом ВЭЗ применительно к решению структурных задач над неоднородностями, близкими к реальным и представленными поднятием и впадиной опорного электрического горизонта бесконечно высокого сопротивления (рис. 36). По-

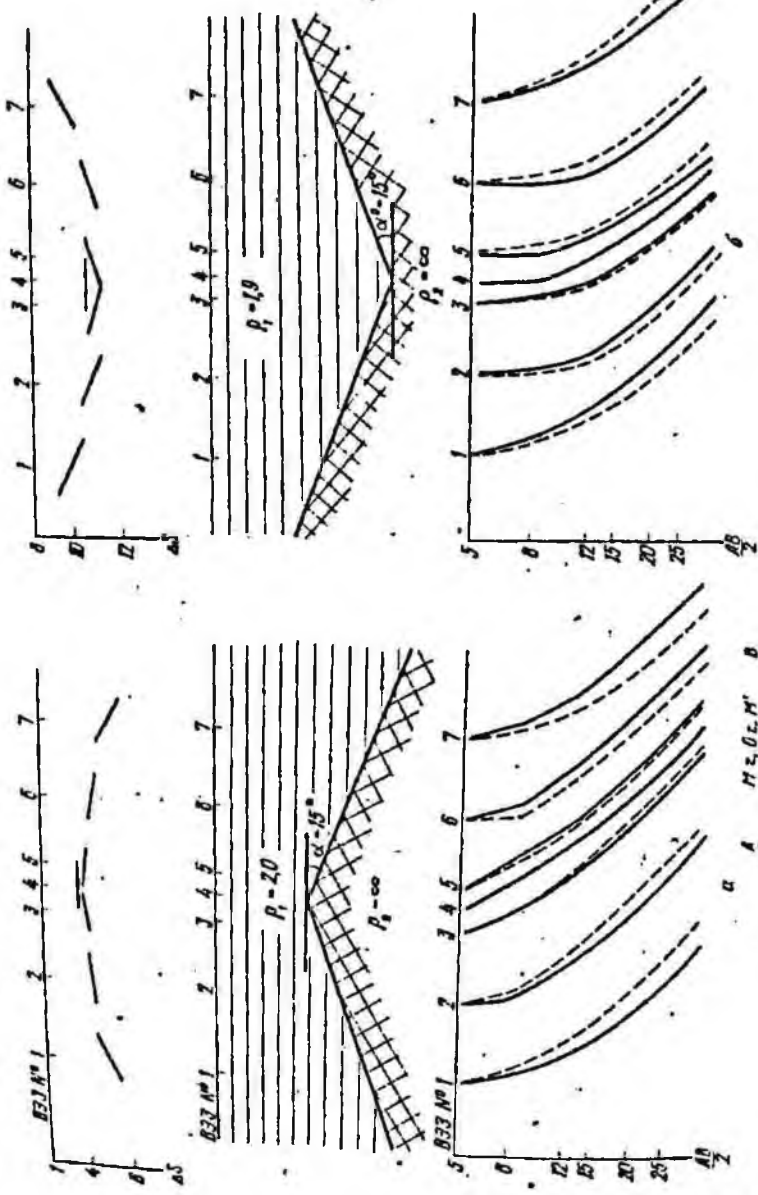


Рис. 26. Результаты дивергентных конденсаций над моделью штифта (а) и пластины (б).

лученные материалы подтверждают вытекающие из теоретических расчетов расхождения кривых КС прямых и обратных установок $A-Mr_{1:1} Or_{2:1}$ разделены от заземления А в опорный горизонт высокого сопротивления $\rho_{1:2}$, а если возмущается, то выше располагаются графики $\rho_{1:2}$, а если возмущается - $\rho_{2:1}$.

Сказанное наглядно подтверждается взаимным расположением кривых КС прямых и обратных установок дивергентных зондирования над моделью высокоомной антиклинали и синклинали (рис. 36). Если подстилающий горизонт характеризуется пониженным по сравнению с перекрывающими породами сопротивлением, что легко определить по виду кривых зондирования, то при том же наклоне горизонта кривые КС прямых и обратных установок меняются местами по сравнению с их размещением, описанным выше. Таким образом, по смене взаимного расположения прямых и обратных кривых дивергентных зондирования можно качественно судить в рельефе опорного электрического горизонта. Наглядное представление о характере последнего даст площадки суммарной проводимости, построенные по снятым в каждой точке профиля значениям с кривых КС прямых и обратных установок. Аналогичным способом можно строить также площадки или графики для определенных разносов $\Delta\rho = \rho_{1:2} - \rho_{2:1}$ и других параметров.

В целом полученные экспериментальные данные свидетельствуют о несомненных преимуществах дивергентных зондирования перед обычными КС, поскольку они позволяют при наличии профильных наблюдений по соотношению кривых $\rho_{1:2}$ и $\rho_{2:1}$ определять характер рельефа опорного горизонта или оценивать направление его падения по данным наблюдений даже в одном пункте.

Подводя итоги результатов моделирования, следует отметить, что несмотря на идеализацию моделей и отличие их от реальных условий, экспериментальные исследования являются очень полезными, так как позволяют оценить разведочные возможности различных видов наблюдений и дать вполне определенные методические рекомендации для окончательного их опробования в полевых условиях.

§ 2. МЕТОДИКА И ТЕХНИКА ПОЛЕВЫХ НАБЛЮДЕНИЙ ДИВЕРГЕНТНЫМИ УСТАНОВКАМИ

Вопросы методики и техники работ обычными установками в модифицированных зондирования и профилирования разработаны достаточно полно и детально освещены в литературе [6, 14, 24]. В связи с этим рассмот-

ны особенности применения дивергентных установок в различных методах, принимая сложившиеся в них методические и технические приемы в качестве основных и акцентируя внимание главным образом на моментах, отличных от общепринятых.

Аппаратура и оборудование

Для полевых наблюдений дивергентными установками полностью применима типовая электроразведочная аппаратура, используемая для регистрации постоянных и низкочастотных электрических полей.

В методах естественного электрического поля при дивергентных наблюдениях приемными установками достаточно иметь измерительный прибор постоянного тока типа электронного стрелочного компенсатора СК-1 или его транзисторных разновидностей (АЗ-72), неполяризуемые электроды и соединительные провода.

Как и при обычной регистрации естественного поля, перед началом работ необходимо проверить правильность полярности измерительного прибора, подключив к его входным зажимам линии M и N внешнего источника известной полярности соответственно клеммам "плюс" и "минус". Стрелка прибора в этом случае при установке переключателя полярности в положение "плюс" должна отклоняться вправо. В соответствии с расчетными формулами для определения $\Delta U_{1,2}$ и $\Delta U_{2,1}$ (1,2) к клемме M подключается средняя точка O' между сопротивлениями r_1 и r_2 , а к клемме N — центральный электрод O . В этом случае характер и знак аномалий естественного поля должны соответствовать расчетным кривым, рассмотренным выше.

Для обеспечения условия стабильности полярности подключения и упрощения процесса выполнения двусторонних дивергентных наблюдений удобно пользоваться простой приставкой, один из возможных вариантов которой показан на рис. 37.

Приставка позволяет при однократном и неизменном подключении линии M , O и M' с помощью одного переключателя регистрировать величины $\Delta U_{1,1}$, $\Delta U_{1,2}$, $\Delta U_{2,1}$, а в случае необходимости — обычную разность потенциалов $\Delta U_{MM'}$. Вполне понятно, что при работе необходимо так же тщательно следить за правильностью подключения приставки к измерительному прибору и приемным электродам. Величина добавочных сопротивлений r_1 и r_2 выбирается с таким расчетом, чтобы она была большая по сравнению с переходным сопротивлением приемных электродов, которое обычно колеблется от нескольких десятков до первых сотен омметров, и малая по отношению к входному сопротивлению измерительного

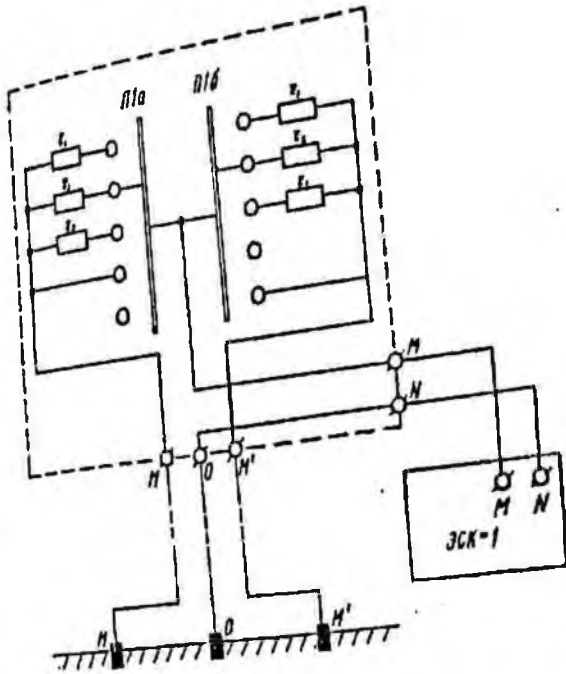


Рис. 37. Схема приотавки для переключения приемных линий при работе дивергентными установками.

прибора (4 - 8 мОм). В соответствии с этим значение сопротивления, приемного за единицу, выбиралось нами около 5 мОм.

В остальном требования к измерительному прибору и производству измеров такие же, как и при обычных наблюдениях.

То же можно сказать и в отношении заземлителей, в качестве которых применяются неполяризуемые электроды системы "ВИРТ" или А.О. Полякова [24]. Учитывая уменьшение измеряемых дивергентными установками величин по сравнению с величинами в методе градиентов и тем более в методе потенциала, необходимо для работы подбирать трехэлектроды с минимальными значениями взаимной поляризации и систематически контролировать ее состояние в процессе наблюдения. Собственную поляризацию электродов, отобранных вначале по минимуму ее значения на основании попарных замеров, в конечном счете необходимо проверить по трехэлектродной схеме, которой ведутся полевые наблюдения. Дело в том, что поляризация крайних электродов, соединяе-

них вместе; может быть меньше поляризации каждого электрода в отдельности, в поэтому необходимо проверить и свести к минимуму поляризацию приемной установки в целом. В остальном правила эксплуатации и ухода за неполяризуемыми электродами остаются такими же, как и при обычных работах.

Для соединения измерительного прибора с приемными электродами можно применять облегченные электроразведочные провода ГПСМПО или телефонные марки ПВР.

В методах, использующих активные электрические поля (сопротивления, заряда и др.), кроме описанных выше измерительной аппаратуры и приемных установок, для работы необходимы еще источники тока и питающие линии.

В качестве источников питания при исследовании малых глубин порядка первых десятков метров и разносах питающей линии в пределах первых сотен метров могут применяться батареи сухих элементов. Сейчас применяются двухсекционные батареи 69-ГРМД-6 и 29-ГРМД-13 (геолого-разведочные марганцевые, цинковые; первая цифра - максимальное напряжение в вольтах, вторая - емкость в ампер-часах), позволяющие получать максимальные рабочие токи 0,5 и 1,0 А, 1 и 2 А при последовательном и параллельном соединении секций соответственно.

При больших глубинах исследования и соответственном увеличении размеров питающих линий для получения надежно измеряемых дивергентными установками величин целесообразно применять электроразведочные станции: наиболее удобной для этих целей является серийная станция ЭРС-16,5 (или новый ее выпуск СГЭ-72), смонтированная на легком и маневренном автомобиле ГАЗ-69 (или УАЗ-469). Станция этого типа, позволяющие при номинальном напряжении 460 В получать рабочие токи до 30 А, весьма удобны для выполнения наблюдений различными методами. Сила рабочего тока регистрируется непосредственно амперметром, включенным через шунт в питающую линию, а разность потенциалов в приемной цепи измеряется стрелочным компенсатором ЭСК-1 или может регистрироваться с помощью прилагаемых к станции измерительной панели ИПО-6, усилителя ЭДА-57 и осциллографа ЭЮ-7. (Усилитель, который, как и ЭСК-1, имеет высокоомный вход, нужен обязательно, так как подключение приставки с добавочными сопротивлениями непосредственно на вход осциллографа будет сильно снижать чувствительность измерительного канала).

При исследованиях верхней части разреза и небольших разносах питающих линий для наблюдений дивергентными установками в качестве ис-

точники и приемная сигналов вполне может быть использована типовая аппаратура низкой частоты АНЧ-1, ККС-50 или ККС-600. В этом случае, как и при работе сложными и дифференциальными установками [67], для определения знака измеряемых величин необходимо пользоваться специальными индикаторами полярности [20] или фазовыми приставками [67]. В остальном правила эксплуатации источников питания и регистрирующей аппаратуры, контроля за их исправностью при наблюдениях дивергентными установками остаются такими же, как и обычными методами.

Приемные линии ничем не отличаются от рассматривавшихся выше в естественных электрических полях. Учитывая, что при наличии искусственных источников поля стационарные посторонние ЭДС, в том числе и поляризации приемных электродов, можно скомпенсировать, требования к заземлителям менее жесткие и в качестве их применяются медные или латунные пикеты. Для прокладки питающих линий используются обычные электроразводочные провода ГЭП, ГПСМП, а для сравнительно малых разностей - ГПСМЮ.

Заземляются линии, как обычно, с помощью железных электродов длиной 1 - 1,5 м.

Стандертым является также вспомогательное оборудование: полые катушки, подставки для них и др., останавливаться на рассмотрении которого нет необходимости.

Методика полевых наблюдений

Как аппаратура и оборудование, так и методика полевых исследований с использованием дивергентных установок во многом сходны с методикой наблюдений обычными способами и определяется геологическими задачами, геоэлектрическими условиями площади и технико-экономическими показателями.

Рассмотрим вкратце особенности методики дивергентных наблюдений в различных модификациях в такой же последовательности, как и аппаратуру, т.е. в естественных и искусственных электрических полях.

В методах естественного электрического поля независимо от его природы измерения дивергентными установками ведутся в качестве детализационных, и по характеру они ближе всего к работам по методу градиента, когда последовательно определяется разность потенциалов между каждой парой смежных точек на профиле [24].

В соответствии с этим наблюдения ведутся преимущественно по профилям, задаваемым вкратце простирания выявленных аномалий естествен-

ного поля или предполагаемых его источников, исходя из общих геологических или гидрогеологических данных.

Как и при съемке градиентов, с целью взаимной увязки и контроля получаемых данных наблюдения дивергентными установками целесообразно также вести по замкнутым полигонам. Следовательно, пересечение аномальной зоны или предполагаемой неоднородности, как правило, следует выполнять по двум параллельным профилям, хотя в условиях сложного рельефа или труднодоступной по другим причинам местности можно ограничиваться и одиночными профилями.

Размеры приемных линий и шаг наблюдений по профилю выбираются в зависимости от глубины залегания предполагаемой неоднородности, ее размеров, а также интенсивности создаваемого на дневной поверхности поля. Как показывают теоретически рассчитанные, а также полученные с помощью трансформации кривые ΔU дивергентных установок над естественно поляризованными телами, наиболее интенсивная часть аномалии укладывается обычно в интервал, равный примерно $2h$, а кривые ΔU , рассчитанные для приемной линии конечных размеров, приближаются к предельным теоретическим при ее длине $MM'/h \approx 1$. Поэтому размеры приемной линии следует выбирать соизмеримыми с предполагаемой глубиной залегания тел, а шаг наблюдений должен быть по крайней мере в два раза меньше. Если наблюдаемое поле достаточно интенсивно, то размеры приемных линий и соответственно шага наблюдений с целью получения более детальных и отчетливых графиков можно уменьшить.

Еще один важный методический вопрос при исследовании естественных электрических полей касается системы перемещения приемных электродов по профилю.

Опыт работ по методу градиента показывает, что наиболее совершенна система с переносом вперед заднего электрода через два интервала, так как при этом собственная ЭДС поляризации электродов выключается на каждом интервале с обратным знаком и, например, при расчете потенциала по профилю автоматически исключается [14, 24].

Учитывая изложенное, а также некоторые технические удобства, наиболее подходящей для наблюдений приемными дивергентными установками является схема с перемещением заднего и центрального электродов вперед на расстояния $2MM'$ и $2MO$ соответственно, т.е. симметрично по отношению к переднему электроду. Возле него удобно также располагать измерительный прибор, который остается неподвижным для двух замеров, а затем перемещается на два интервала вперед (рис. 38). Для такой системы перемещения приемных электродов на соседних интер

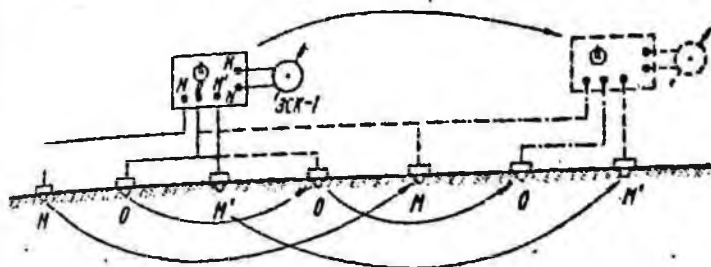


Рис. 38. Схема перестановки заземлений и прибора при наблюдениях дивергентными установками в естественных электрических полях.

Важно направление подключения полудиплей сменяется обратным, т.е. NO и OM' заменяется на OM' и NO и т.д., что способствует исключению возможного накопления систематических ошибок одного знака за счет поляризации электродов. При этом, как следует из рис. 38, для соблюдения правильности знака измеряемых величин необходимо лишь на панели приставки поменять местами отводы периферийных электродов, а центральные оставить без изменений.

Кроме того, используя переключения на приставке, можно при тех же заземлениях сокращать шаг наблюдения до половины длины приемной линии, т.е. до $NO = CM'$ или для большей надежности и опосредованно выполнять параллельно измерения градиентов потенциала на полудиплях NO и OM' . В этом случае так же, как и в способе градиента с перестановкой заднего электрода через интервал, направление подключения электродов в смежных парах поочередно меняется.

Описанным способом перестановки электродов осуществляется переход на соседний профиль и возвращение во встречном направлении в исходный пункт. При этом правила, касающиеся контрольных измерений поляризации электродов через 10 - 20 точек, увязки полигонов и т.п., принимаются такими же, как и в методе градиентов [14]. Необходимо только более тщательно следить за точностью линейных размеров и симметричностью приемной линии относительно центрального электрода.

Очень внимательно необходимо относиться к определению знака измеряемых величин, особенно, когда наблюдения ведутся через интервал, равный NO , и поочередно различные электроды служат центральным заземлением. Последнее всегда должно быть подключено на клемму "0" при-

ставки, а присоединение к ней периферийных электродов должно соответствовать одному, принятому для данной площади или участка, расположению установки $M_{1111} O_{1111} M'$ на местности. По аналогии с правилами, принятыми для размещения положительных и отрицательных питающих электродов в обычных методах электропрофилирования [67], целесообразно также располагать в западной части профиля любой ориентации, а при меридиональном или близком к нему направлении - на юге.

При соблюдении этого правила на одиночных профилях результаты будут одинаковы, независимо от направления отработки профиля.

Однако при наблюдениях по замкнутым полигонам для того, чтобы сумма приращений наблюдаемых величин при полном обходе контура равнялась нулю (теоретически), необходимо, как и в способе градиента, закреплять неизменным положение переднего и заднего электродов (например, M' и M'').

При наблюдениях дивергентными установками остаются в силе все меры по обеспечению идентичности условий заземления (разрыхление почвы, подъемка лунок и др.), которые могут существенно влиять на результаты обычных [24] и тем более дивергентных наблюдений.

В процессе выполнения работ необходимо также осуществлять систематический контроль за качеством и точностью получаемых данных. Для этого, как и при наблюдениях методом градиентов [14], необходимо выкладывать через 10 точек в нормальном и через 5 точек в аномальном полях пятиугольные (без изменений в схеме) наблюдения, а через 10-20 точек камеренная поляризации электродов. Кроме того, на отдельных, преимущественно аномальных участках, осуществляется независимый контроль с помощью повторенных наблюдений в количестве от 5 до 30% общего объема в зависимости от расхождения основных и контрольных замеров. Максимальную величину расхождения 5 мВ в спокойном поле и 15 мВ на аномальных участках по аналогии с методом градиентов [14] можно считать допустимой и принимать как основной критерий оценки качества в точности наблюдений.

Величина ошибок замкнутых полигонов не должна превышать 5-10%. Промысловые требования и рекомендации, позаимствованные из практики геологических методов измерения потенциала, являются ориентировочными, и должны быть в полной мере уточнены по мере накопления полевых материалов в целях работ дивергентными установками в естественных электрических полях.

Методика измерений с использованием искусственных источников электрического поля тесно во многом сходна с методикой ис-

исследований обычными установками. Из всех разновидностей дивергентных установок для практического применения как с точки зрения техники измерений, так и получаемых результатов наиболее удобными являются двусторонние наблюдения в поле цепи двух заземлений АВ. Некоторая особенность применения этих установок в модификации профилирования с неподвижными питающими электродами $A \rightarrow M_{1,2} \text{ } \sigma_{1,2} \text{ } M' \rightarrow B$ и зондирования $A \rightarrow M_{1,2} \text{ } \sigma_{1,2} \text{ } M' \rightarrow B$ рассмотрим ниже.

В большинстве случаев дивергентные установки целесообразно применять в комплексе с обычными, так как они, за исключением расширившейся лишь приставки, не требуют дополнительной аппаратуры и оборудования. Благодаря повышенной дифференциации графиков и разведывательной способности дивергентные установки могут с успехом использоваться для детализации аномалий, выявленных обычными методами, или применяться в качестве основных наблюдений при детальных крупномасштабных исследованиях. Наблюдения выполняются, как правило, вдоль односторонних (детализация) или системы параллельных (площадная съемка) профилей, ориентированных по возможности вкrest простирания предполагаемых неоднородностей или структур. Максимальная величина разности потенциалов питающей линии АВ, как и для обычных методов, зависит от глубины исследования и может изменяться от первых десятков метров до нескольких километров.

Выбор модификации наблюдений зависит от решаемых геологических задач, характера и глубины залегания изучаемых объектов и других условий. С целью трассирования литологических и тектонических контактов, оконтуривания локальных неоднородностей и т.п. рациональнее использовать профилирование, а для определения характера рельефа опорного горизонта и структурных построений — зондирование дивергентными установками.

Профилирование установками $A \rightarrow M_{1,2} \text{ } \sigma_{1,2} \text{ } M' \rightarrow B$, проводимое с помощью наблюдений трехэлектродной приемной установкой $M_{1,2} \text{ } \sigma_{1,2} \text{ } M'$ в центральной части неподвижной линии АВ подобно съемке срединных градиентов, очень удобно для площадных исследований и прослеживания узких и протяженных неоднородностей, полностью укладывающихся в один интервал наблюдений.

По аналогии с методом срединного градиента и дипольного площадного картирования [67] наблюдения ведутся обычно по заранее разбитой сети вдоль центрального, совпадающего с линией АВ, и нескольких или целой системы боковых профилей, параллельных основному и образующих планшет. Длина рабочего интервала, определяемая областью плавного изменения наблюдаемых величин, в связях с более крутыми их

спадом по мере удаления от питающих электродов [22] может быть увеличена по сравнению с обычно применяемой $1/3 AB$ до $0,4 - 0,5 AB$. Кроме этих чисто технических ограничений, на длину рабочего интервала, как и в методе среднего градиента, влияют и геологические факторы, связанные с уменьшением глубинности исследования по мере движения от центра установки к питающим электродам [25].

Если сопротивление разреза по глубине не изменяется (графики рекогноспировочных кривых ВЗЗ на разнотах, охватывающих интервал исследования и среднего градиента, параллельны осям глубин и расстояния соответственно), то руководствоваться при выборе рабочего интервала можно только техническими соображениями. Максимальное удаление боковых профилей от центрального выбирается с таким расчетом, чтобы знак регистрируемых вторых разностей в пределах планового источника по направлению, параллельному оси абсцисс, как и параллельная составляющая поля диполя, меняет знак при отклонении от оси α на угол $\theta = 54^{\circ}44'$. Поэтому, учитывая возможные вариации критического угла в неоднородных средах в ту или иную сторону, можно предельные отклонения линии, соединяющей питающее заземление с ближней точкой крайнего профиля, от оси установки принимать равными $45 - 50^{\circ}$. Это равносильно удалению крайних профилей от центрального на $(0,25 \pm 0,3) AB$. Расстояние между профилями определяется масштабом съемки, протяженностью и выдержанностью исследуемых объектов и, как для обычных исследований методом среднего градиента [14], может колебаться в пределах от первых десятков до 100 м и более с таким расчетом, чтобы изучаемый объект пересекался не менее, чем тремя профилями.

При картировании неоднородностей под наносами размеры установки должны превышать мощность последних, как и для дивергентных установок в поле диполя [22], не менее, чем в четыре-пять раз при исследовании крутопадающих высокоомных включений и в семь-десять раз при изучении наклонных контактов и выклинивающихся пластов.

Размеры приемных линий выбираются также, исходя из технических и геологических соображений. Учитывая, что ширина аномалии над одиночным контактом на графиках дивергентных установок равняется длине приемной линии, желательно, чтобы размер последней был меньше видимой мощности искомым неоднородностей, а также расстояния между ними. Однако иногда по техническим условиям с целью получения уверенно измеряемых величин приемные линии необходимо удлинять.

В этом случае аномалии лишь расширятся и немного сгладятся, но сохраняют свои амплитуды и пространственное положение, так как последние для установок $A-Mr_{121} Or_{211} M-B$ от размеров приемной линии не зависят. Шаг наблюдений должен быть кратным размеру приемной линии и для уверенного фиксирования аномалий не менее, чем тремя значениями не должен превышать 0,5 МО или четверти общей длины линии. В аномальных зонах необходимо проводить детализацию с уменьшением размеров приемных линий или по крайней мере шага наблюдений.

Техника выполнения наблюдений дивергентными установками во многом сходна с обычными исследованиями методом среднего градиента.

Повышенные требования необходимо предъявлять к соблюдению точности линейных промеров и размеров установок на местности, особенно симметрии приемной линии, а также изоляции питающих и приемных линий с целью предупреждения утечек. Работы могут выполняться как на постоянном, так и на переменном токах.

При наблюдениях с постоянным током измерения производятся электронными компенсаторами ЭСК-1 или АЗ-72, а в качестве источников питания используются батареи 69-ГРМЦ-13 и 69-ГРМЦ-6 или генераторные группы, располагаемые обычно у одного из заземлений или за пределами профилей наблюдений.

Приемные линии при наблюдениях с одним прибором подводятся кондукторами к источнику питания. Однако при съемке по планшетам, когда профилей наблюдений много, можно, особенно при генераторном питании, измерения вести автономно сразу несколькими приборами, которые перемещаются по профилям вместе с приемными линиями. Генераторная группа в этом случае работает непрерывно, посылая в землю импульсы разной полярности и соответственно продолжительности, ориентируясь по которой оператор определяет знак измеряемых величин. Такой способ работы, кроме повышения производительности, более предпочтителен с точки зрения влияния на результаты наблюдения утечек в питающей линии.

Необходимо тщательно следить, как и при наблюдениях в естественных полях, за правильной полярностью подключения выходных клемм генератора или полюсов батарей к питающим заземлениям, приемной линии к приставке и прибору, а также самого прибора. Положительное заземление питающей линии А для определенности следует располагать с запада и впа по отношению к остальным электродам.

Исследования на переменном токе выполняются с помощью низкочастотной аппаратуры АНЧ-1, ИКС-50 или ИКС-600 с использованием индикаторов полярности или фазовых приставок для определения знака измеря-

омых пелачин. Несмотря на повышенную помехозащищенность и чувствительность низкочастотной аппаратуры максимальные разности питающей линии следует выдирать небольшими, определяемыми примерно [8]

$$AB = 500 \sqrt{\frac{\rho}{f}}$$

где ρ - удельное сопротивление среды в Ом·м; f - частота поля в Гц.

До этих разностей, которые при частоте 20 Гц и среднем сопротивлении разреза 100 Ом·м составляют 1100 м, кривые какудикся сопротивлений на постоянном и переменном токах совпадают, имеют общие теоретические основы и, следовательно, приемн истолкования.

Питающая линия, как обычно, разматывается в виде прямоугольной полупетли, а наблюдения ведутся одновременно несколькими приборами.

За исключением определения полярности измеряемого сигнала в каждой точке, в остальной техника наблюдения не отличается от общепринятой и определяется требованиями инструкции [14] и руководства по типовой электроразведочной аппаратуре низкой частоты [8].

Наращивание планшетов при работе по методу срединного градиента с произвольными источниками тока можно вести в любом направлении, хотя в целях максимального использования уже проложенных на местности проводов при наблюдениях на постоянном токе перемещения удобно осуществлять вдоль, а с переменным - вкрас направлении питающей линии АВ.

Характерной отличительной особенностью наблюдения с дивергентными установками является измерение малых величин, и поэтому особое внимание необходимо уделять точности измерений. В связи с этим необходимо добиваться максимально возможной силы тока в питающей цепи и поэтому почти всегда (за исключением малых глубин исследования и разностей) предпочтительнее применять электроразведочные станции при работе с постоянным и более мощные генераторы при работе с переменным токами.

С другой стороны, следует максимально использовать чувствительность приемной аппаратуры. Тем не менее, учитывая перемену знака регистрируемых дивергентными установками величин, даже при соблюдении всех перечисленных выше требований, всегда будут нулевые и близкие к ним малые значения, недопустимые по действующим инструкциям.

С целью исключения из построений и дальнейшего рассмотрения неподостовренных замеров можно воспользоваться способом, предложенным

нами ранее [22]. При построении знакопеременных величин в логарифмическом масштабе необходим его разрыв и смена направлений отсчета. Последний, учитывая изложенное выше, можно выбрать так, чтобы все выходящее за пределы, расположенные обычно в безаномальных зонах, замеры находились в его пределах, которые легко определить для конкретных условий и размеров установки по формуле

$$\pm \rho_{1;2(2;1)} = K_{1;2(2;1)} \frac{\pm \Delta V_{1;2(2;1)}^{\text{доп}}}{I}$$

где $\pm \Delta V_{1;2(2;1)}^{\text{доп}}$ - минимальные значения измеряемых разностей потенциалов, которые можно считать допустимыми; I - среднее значение силы тока. При использовании в качестве измерительного прибора электронных компенсаторов предельно допустимые измеряемые величины можно уменьшить с 0,3 до $\pm 0,1$ мВ. Тогда при разрыве масштаба графиков на уровне $\pm \rho = 0,1 K_{1;2(2;1)} / I$ из них автоматически выключаются значения, полученные при измеряемых величинах меньше $\pm 0,1$ мВ, а оставшиеся замеры, в частности на аномальных участках, будут вполне надежными.

Несмотря на это наблюдения, как и в методе градиента, при измерениях малых разностей потенциалов [14] должны выполняться очень тщательно с большим количеством (10 - 20%, а при особенно трудных условиях 30%) повторных измерений, являющихся основным критерием определения надежности получаемых данных.

Для оценки точности и качества наблюдений дивергентными установками, очевидно, могут быть полностью применены указания инструкции по оценке этих параметров при измерениях малых величин. Согласно последним, средняя величина относительного расхождения основных и контрольных замеров по планшету не должна превышать 5%, а в отдельных точках - 15%. При этом пункты, в которых измеряемые величины меньше 0,1 мВ, могут не учитываться, так как в последующих построениях они не участвуют.

В целях независимого контроля и большей надежности получаемых данных желательно параллельно регистрировать обычные разности потенциалов MO , OM' или MM' , которые позволяют контролировать правильность регистрируемых дивергентными установками величин, используя простую связь с обычными градиентами (1,7; 1,6) $\Delta U_{MM'} = 3(\Delta U_{1;2} - \Delta U_{2;1})$. Учитывая, что знаки величин $\Delta U_{1;2}$ и $\Delta U_{2;1}$ разные, градиент $\Delta U_{MM'}$ равен утроенной сумме абсолютных значений $\Delta U_{1;2}$ и $\Delta U_{2;1}$. Желательно, чтобы такой контроль проводил оператор или вычислитель непосредственно во время замеров, что позволит своевре-

менно выявить и устранить незакономерные отсчеты, связанные с влиянием утечек, помех или других причин. В этом случае количество повторных наблюдений можно сократить до обычных 5%.

Помимо оперативного контроля наличие кривой градиента позволяет установить правильный знак графиков дивергентных установок в случае, если бы в процессе работ была ошибочно изменена полярность подключения питающих или приемных линий.

Результаты наблюдения записываются в журналы, сходные по форме с обычными, в которые заранее выписываются коэффициенты, рассчитанные по формулам, приводившимся в гл. I.

Следует считать обязательным параллельный расчет и построение графиков кажущихся сопротивлений, позволяющих непосредственно в поле обнаруживать аномальные зоны и тщательно их оконтуривать.

Зондирования дивергентными установками выполняются, как правило, параллельно с обычными вертикальными зондированиями и отличаются от них тем, что в центре приемной линии устанавливается дополнительный электрод и на каждом разносе, кроме обычной разности потенциалов, измеряются величины $\Delta U_{1,2}$ и $\Delta U_{2,1}$ с помощью упоминавшейся выше приставки.

В связи с этим все методические требования, касающиеся выбора масштаба и густоты сети точек наблюдения, направления профилей, размеров питающей и приемной линий являются общими и поэтому останавливаться на них нет необходимости.

Общепринятой сохраняется и техника выполнения зондирования дивергентными установками как с батарейными, так и генераторными источниками питания. Некоторое отличие состоит лишь в том, что так же, как и в профилировании, необходимо тщательно следить за постоянной полярностью питающих заземлений и подключений к измерительному прибору приемных линий, а также за отсутствием утечек в питающих и приемных линиях, особенно в сырую погоду. Требования к точности регистрируемых дивергентными установками величин, очевидно, могут быть приняты такими же, как для обычных зондирования при трудных условиях измерений, т. е. относительное расхождение основных и контрольных наблюдений для каждого соответствующего разноса не должно превышать 7%, за исключением закономерных смещений начальных ветвей кривых зондирования, вызванных изменением сопротивления верхнего слоя вследствие изменения климатических условий.

Если отсчеты берутся визуально, полученные значения измеряемых величин заносятся в полевой журнал и параллельно с замерами строятся

кривые зондирования с целью обнаружения и ликвидации незакономерных отклонений от плавного хода кривых.

При работе с электроразведочной станцией и применении осциллографической записи наблюдения дивергентными установками должны вести измерительным каналом с усилителем постоянного тока, обладающим подобно самокомпенсатором высоким входным сопротивлением, допуская подключение на вход приставки с добавочными сопротивлениями. В принципе можно, хотя это менее удобно, вести регистрацию и без усилителя непосредственно по схеме ИЮ-осциллограф, но в этом случае необходимо предварительно проверить и уравнивать сопротивления приемых полуэлектродов с помощью реостата, подключаемого последовательно в цепь с меньшим сопротивлением.

Зондирования дивергентными установками могут также проводить с помощью низкочастотных переменных полей по аналогии с профилированием в области небольших равновесий (в среднем до $AB = 1000$ м), в пределах которых данные наблюдений на постоянном и переменном токах совпадают. При этом необходимо только определять знак измеряемых разностей потенциалов с помощью упоминавшихся выше индикаторов или фазовых приставок.

Таким образом, применение дивергентных установок при зондированиях также не требует дополнительных приборов, оборудования или другого оснащения и может быть выполнено в любом отряде, ведущем работы методом сопротивлений на постоянном или переменном низкочастотном токах. Выполнение дивергентных зондирований параллельно с ВЭЗ равносильно производству последних в трудных условиях измерения ΔU , когда на одной точке приходится делать по несколько замеров, а в итоге позволяет получить в каждом пункте помимо кривой ВЭЗ еще две кривые зондирования. Последние подобно двусторонним дипольным зондированиям дают возможность судить о наклоне слоев или других изменениях параметров разреза и по количеству получаемой информации, безусловно, окупают те незначительные затраты времени, необходимые для их получения попутно с ВЭЗ.

Измерения дивергентными установками в методе заряженного тела по методике и технике наблюдения ближе всего к измерениям над заряженным телом градиента потенциала и поэтому имеют много общего с ними. Исследования проводятся, как правило, в крупных масштабах по заранее разбитой сети профилей через 20 - 40 м, перпендикулярных к базисному профилю, совпадающему с предполагаемым простиранием заряженного тела. Работы могут выполняться на постоянном, пульсирующем или

переменном токе в зависимости от уровня промышленных помех и различной аппаратуры.

Во всех случаях регистрация вторых разностей потенциала ведется приемной линией *Мг 1123 От 2113 М'* по профилям аналогично наблюдениям в методе естественного поля с тщательным соблюдением полярности измерительных цепей.

Все, что касается питающей цепи АВ, — заземление ее положительного полюса в рудном теле, отнесенное второго электрода на бесконечность, контроль за постоянством силы тока и другие вопросы техники наблюдения остаются теми же, что и при обычных наблюдениях.

В случае нескольких заземлений в различных точках рудного тела, когда при одном положении приемных электродов ведутся наблюдения потенциала и его градиента в поле всех источников, целесообразно вести измерения и дивергентными установками.

Приемные линии могут подводиться к питающим или же располагаться отдельно при автономных наблюдениях по профилям. Размеры линии должны быть несколько больше, чем при измерениях градиента и могут колебаться в пределах 20-50 м.

Если работы ведутся на постоянном токе для определения полярности измеряемых сигналов, как и в случае профилирования, необходимо в землю подавать непрерывно короткие импульсы с более продолжительными паузами.

Учитывая, что даже обычные наблюдения по методу заряженного тела относятся к трудным, так как обычно измеряются малые величины при наличии интенсивных помех, к той же категории следует отнести и наблюдения дивергентными установками, и поэтому количество повторных измерений должно составлять не менее 30% общего числа заземлений. Желательно также, как и при профилировании, вести параллельно наблюдения градиентов потенциала и осуществлять независимый и оперативный контроль за соответствием и правильностью регистрируемых величин.

Критерии оценки точности наблюдения сохраняются теми же, что и при профилировании: среднее относительное расхождение первоначальных и контрольных наблюдений в целом по планшету не должно превышать 5%, а в отдельных точках — 15%. Здесь также при подсчетах могут не приниматься во внимание значения разностей потенциалов меньше 0,1 мВ.

Документация наблюдений тоже включает ведение журнала и вычерчивание полученных графиков непосредственно в поле.

§ 3. ИНТЕРПРЕТАЦИЯ ПОЛЕВЫХ МАТЕРИАЛОВ

Под интерпретацией материалов обычно понимается сложная комплекс приемов их обработки и истолкования, направленный на получение наиболее полного и достоверной геологической информации.

Интерпретация представляет собой единый процесс, который ведется непрерывно как во время полевых работ, так и после их завершения, тем не менее ее можно подразделить на следующие основные этапы [67]: обработку материалов, качественную и количественную интерпретации и составление геологической документации. Иногда первые три этапа относят к разряду геофизической, а последний - к геологической интерпретации. Методика обработки и интерпретация результатов наблюдений дивергентными установками, находящиеся пока в стадии разработки и базирующиеся на результатах описанных выше теоретических расчетов и данных моделирования, в целом сходны с методикой истолкования данных исследований обычными методами.

Рассмотрим коротко особенности обработки и истолкования данных наблюдений дивергентными установками по каждому из описываемых выше методов.

Обработка и представление данных наблюдений

В методах естественного поля обработка и изображение результатов могут быть общими независимо от геологической природы аномалии и решаемых задач. Они будут зависеть главным образом от детальности исследования и масштаба съемки.

Учитывая детализационный характер наблюдений дивергентными установками вдоль отдельных профилей, основным материалом по каждому из них следует считать графики $\Delta U_{1,2}$ и $\Delta U_{2,1}$. На графиках могут просто откладываться измеряемые величины, полученные при постоянном размере приемной линии. Если же это условие не соблюдено, то наблюдения данные можно нормировать и приводить к единице длины линии. Такой способ вполне приемлем для качественных построений, ибо абсолютные значения измеряемых величин, как уже упоминалось в гл. I и показано на примере поля гальванокоррозии трубопроводов, в связи со сложной их зависимостью от размеров приемной линии возрастет по мере увеличения последней. Влияние приемной линии может быть учтено точно только с помощью коэффициентов, рассчитываемых по аналогии с искусственными полями в случае, если известны координаты источника тока. В принципе, возможен также вариант, когда по наблюдениям графикам устанавливается примерное местоположение источника, на-

посредственно используемое затем для более точной их перестройки. Очевидно, что в связи с трудоемкостью таких операций, приемлемых только для одиночных тел, прибегать к ним следует лишь на особенно важных или интересных объектах. Обычно достаточно ограничиться построением графиков наблюдаемых величин, нормированных при разном приеме приемных линиях размер последних.

В искусственных электрических полях, как уже отмечалось в гл. I, данные как полевых наблюдений, так и теоретических расчетов и моделирования обрабатываются с помощью коэффициентов и изображаются в виде графиков кажущихся сопротивлений. В отличие от обычных методов при расчетах и построениях следует принимать во внимание знаки коэффициентов в соответствии с принятой полярностью установок на местности. Учитывая, что диапазон изменения кажущихся сопротивлений, определяемых с помощью дивергентных установок (при тех же истинных сопротивлениях сред), шире, чем пределы измерения КС обычных установок, а также удобства сопоставления с теоретическими кривыми, масштаб для построения графиков профилирования следует выбирать логарифмический. Разрыв масштаба, как уже упоминалось выше, необходимо выбирать с таким расчетом, чтобы в него укладывались все значения разностей потенциалов, меньше допустимых, и практически исключались из последующего анализа и построений.

Такие же правила соблюдаются и при построении кривых дивергентных зондирования с той только разницей, что они строятся в двойном логарифмическом масштабе.

В методе заряженного тела основным материалом также являются графики непосредственно наблюдаемых величин, которые в случае необходимости, так как местоположение источника поля известно могут быть с помощью коэффициентов пересчитаны в графики кажущихся сопротивлений. Исключительно из-за трудоемкости применение последнего способа следует рекомендовать лишь в отдельных случаях.

Не останавливаясь на выполнении профильных построений, которые ничем не отличаются от обычных, рассмотрим вкратце методику составления корреляционных планов. Последние, являясь в ряде случаев основным результатом интерпретации, представляют собой совокупность профилей (с графиками), нанесенных на план с учетом их расположения на местности по способам, рекомендуемым для обычного электропрофилеирования [67]: безмасштабному, в масштабе карты и с искажениями в одном направлении.

Масштаб корреляционного плана выбирается таким образом, чтобы графики, обычно располагающиеся примерно симметрично относительно

своего профиля, не пересекались с соседними профилями. При необходимости можно уменьшать модуль применяемого логарифмического масштаба.

По результатам зондирования, кроме самих кривых, которые удобно наносить на один бланк вместе с кривой ВЗЗ, для наглядности можно выполнять, как и по данным двусторонних дипольных зондирования, различные качественные построения графиков, векторов и площадок $\Delta\rho = \rho_{1,2} - \rho_{2,1}$, $\Delta S = S_{1,2} - S_{2,1}$ для различных разностей, разрезы КС для каждой из ветвей и т.п. По оси глубин, как и для ВЗЗ, обычно откладывается величина полуразноса $AB/2$, но если имеются параметрические данные и по участку изучена связь разностей AB с глубиной исследования, то разрезы можно перевести в разряд количественных, и вертикальную ось оцифровать непосредственно в глубинах.

Некоторые приемы интерпретации

Интерпретацию результатов наблюдения дивергентными установками, как и обычными, можно подразделить на качественную и количественную, хотя деление это во многом условное.

В процессе качественной интерпретации тщательно анализируется весь материал с целью установления его связи с особенностями геоэлектрического разреза и закономерностей изменения последнего как по площади, так и по разрезу. Судить об изменениях разреза по глубине в большинстве случаев можно лишь по данным электрических зондирования.

Количественная интерпретация, базирующаяся на сопоставлении полевых материалов с палеточными кривыми и численных расчетах, для электропрофилеирования означает установление планового положения, элементов залегания и оценку истинных сопротивлений тех или иных геологических неоднородностей, а для зондирования — определение сопротивлений и мощностей электрических горизонтов, слагающих изучаемый геологический разрез.

Дивергентные установки по своей сущности наиболее эффективны в выявлении горизонтальных неоднородностей в разрезе, что обуславливает более широкое применение различных модификаций профилирования, а следовательно, и приемов интерпретации, разработанных для этого вида наблюдений.

Рассмотрим основные особенности истолкования материалов, полученных с помощью дивергентных установок в той же, что и ранее последовательности, т.е. в естественных и искусственных электрических полях.

Результаты наблюдений по всех методах естественного поля представляются преимущественно в виде графиков наблюдаемых значений прямых и обратных установок по профилям. Следовательно, первым этапом их истолкования является выделение характерных аномалий, главным образом пересечений, совпадающих в плане почти во всех случаях с искомыми объектами, и корреляция их от профиля к профилю по площади. Затем, используя имевшиеся буровые или другие геологические данные, необходимо установить геологическую природу выявленных аномалий. Следует иметь в виду, что иногда даже очень хорошо коррелирующиеся аномалии могут быть вызваны наличием кабелей, трубопроводов или других подземных сооружений, которые, если они не являются объектом исследования, необходимо из дальнейшего рассмотрения исключить. После этого по наиболее характерным аномалиям можно приступить к количественным определениям, сообразуясь с особенностями их площадного распространения (локальные или линейные проводники) и теоретическими кривыми над неоднородностями такого вида.

Способы оценки глубины залегания источников естественного поля, главным образом окислительно-восстановительного происхождения, рассматривались выше при изучении характера теоретических графиков и поэтому останавливаться на них здесь нет необходимости. Вполне вероятно, что приводившиеся приемы решения обратных задач далеко не единственные, а только представляют один из возможных вариантов.

В большинстве случаев определение глубины залегания источников естественного поля можно считать конечным результатом интерпретации, так как при теоретических расчетах реальные тела, как правило, аппроксимируются системой зарядов, а размеры неоднородностей в расчетных формулах не фигурируют.

Подобным образом осуществляется интерпретация результатов профилирования и в искусственных электрических полях. Так же выделяются характерные аномалии на каждом из профилей и ведется их площадная корреляция с учетом геолого-тектонических особенностей площади. Отдельно выделяются аномалии, связанные с подземными объектами или рельефом местности. Влияние последнего изучалось нами ранее с помощью моделирования [22], в результате которого установлено, что впадина и выступ рельефа вызывает аномалии, сходные с пластинами пониженного и повышенного сопротивления соответственно.

Собравшись с характером теоретических графиков, над наклонными контактами и пластинами можно наряду с плановым положением определять и направление их падения. Построения будут более надежными, если име-

ются результаты профилирования по нескольким расположенных рядом профилям или данные двусторонних зондирований дивергентными установками в приконтактных зонах.

Кроме элементов залегания, в ряде случаев можно оценить и значения истинных сопротивлений, используя горизонтальные предельные асимптоты кривых КС за пределами аномальных зон. Над вертикальным контактом для этих целей могут быть использованы также положения площадок равного сопротивления и соотношения между значениями экстремумов и истинными сопротивлениями контактирующих сред (3.6), (3.7), (3.20).

Поскольку зондирования дивергентными установками выполняются параллельно с обычными (или по крайней мере последние всегда можно рассчитать по данным дивергентных измерений), методика количественных определений по ним не разрабатывалась. Предполагается, что данные количественной интерпретации классического и досконально разработанного метода ВЗЗ вполне достаточно. Результаты дивергентных зондирования, увязанные с помощью кривых ВЗЗ с глубинами и электрическими горизонтами, целесообразно использовать для определения направления падения последних, нарушения горизонтальной однородности типа вертикальных контактов, локальных включений и т.п. Вспомогательными материалами при этом могут служить графики КС для определенных разностей, интерпретируемые как данные профилирования, уже упоминавшиеся графики и профили векторов $\Delta\rho = \rho_{1,2} - \rho_{2,1}$, $\Delta S = S_{1,2} - S_{2,1}$ и другие построения на усмотрение интерпретатора применительно к конкретным геологическим условиям. Истолкование этих графиков или профилей не вызывает затруднений. Так, при сопротивлении подстилающего горизонта $\rho_2 > \rho_1$, что легко устанавливается по виду кривых зондирования, если величина $\Delta\rho$ отрицательна, падение горизонта определится в сторону электрода А, а если положительна — то в сторону заземления В. Если $\rho_2 < \rho_1$, то при тех же знаках $\Delta\rho$ направление падения горизонтов обратное.

Интерпретация данных наблюдений в методе заряженного тела весьма сходна с истолкованием аномалий в естественных электрических полях и даже несколько проще в связи с тем, что по крайней мере в одном пункте наличие рудного тела и глубина его залегания известны. Следовательно, в конечном итоге необходимо определить горизонтальные размеры тела и его пространственное положение. Для решения этих задач, рассматривавшихся выше приемов определения контуров вытянутых (явевных) проводников в плане (по равноименным экстремумам двусторонних дивергентных кривых), и оценки глубины их залегания вполне достаточно.

В заключение отметим, что описанные приемы интерпретации в искусственных электрических полях как в модификации профилирования, так и зондирования были опробованы в довольно большом объеме при поисках залежей калийных солей в Предкарпатье [22], и полностью себя оправдали. Что же касается остальных методов, то пока для них только заложены основы интерпретации, которые необходимо развивать и совершенствовать по мере накопления фактического материала в конкретных геологических условиях.

ПРИМЕРЫ ПРАКТИЧЕСКОГО ПРИМЕНЕНИЯ ДИВЕРГЕНТНЫХ УСТАНОВОК ДЛЯ РЕШЕНИЯ РАЗЛИЧНЫХ ГЕОЛОГИЧЕСКИХ ЗАДАЧ

В предыдущих главах был описан довольно широкий круг методов их модификации, в которых дивергентные установки павли или могут найти применение благодаря преимуществам, вытекающим из теоретических расчетов и подтвержденных результатами моделирования. Однако вполне понятно, что этим комплексом, достаточно наглядно иллюстрирующим свойства и высокую разрешающую способность новых установок, нельзя было ограничиваться, так как только экспериментальные наблюдения в реальных геологических условиях позволяют установить степень соответствия теоретических расчетов полевым данным и геологическую эффективность последних.

В связи с этим параллельно о теоретическими исследованиями и моделированием велись опытные полевые наблюдения дивергентными установками, главным образом при поисках и разведке залежей калийных солей в Предкарпатье. Эти исследования, уже вышедшие из стадии опытно-промышленной проверки, внедрены в практику разведки и в настоящее время широко применяются производственными организациями [22].

Для решения иных геологических задач, связанных с исследованием карстовых подостей и оконтуриванием нефтегазовых залежей и т.п., дивергентные установки применялись эпизодически и в значительно меньших объемах. Однако здесь мы не стремились осветить геологические результаты, полученные с помощью дивергентных установок по отдельным площадям или участкам, а приводим лишь отдельные фрагменты, иллюстрирующие соответствие данных теоретических и полевых исследований, а также преимущества дивергентных установок по сравнению с обычными в реальной геологической обстановке. Примеры, к рассмотрению которых мы перейдем, должны показать реальность применения дивергентных установок в различных геологических разрезах и способствовать расширению круга решаемых с их помощью геологических задач.

§ 1. ПОИСКИ ЗАЛЕЖЕЙ КАЛИЙНЫХ СОЛЕЙ В ПРЕДКАРПАТЬЕ

Залежи калийных и каменных солей в Предкарпатском прогибе, представляющем собой крупный сильно дислоцированный синклинорий, содержится в мезозойских отложениях миоцена, представленных соленосными глинами и брекчиями с прослоями аргиллитов, алевролитов и песчаников. Соли залегают многоярусно в виде отдельных пластов и линз мощностью до 70 - 100 м, образующих поля солевых залежей, простирающи-

в Карпатском направлении на 2 - 4 км при ширине 1 - 2 км. Учитывая приуроченность месторождения к глубоким синклиналям и крыльям крупных антиклинальных складок, солевые пласты и линзы зачастую круто падают и распространяются на глубины от 50 до 1000 м и более. В местах неглубокого залегания соленосных отложений в результате трещинковенения пресных вод и выщелачивания ими солей образуются специфические отложения, так называемая гипсо-глинистая шляпа, мощность которой колеблется от первых десятков до 200 м и более.

Породы, слагающие соленосные бассейны, как показывает анализ данных бокового стандартного каротажа скважин, дифференцируются по электрическим свойствам [22]. Наиболее низкими сопротивлениями от холма до нескольких ом-метров характеризуются отложения гипсо-глинистой шляпы и глины, повышенными, порядка нескольких десятков ом-метров - аргиллиты, пачаники и соленосная брекчия, высокими, в пределах первых сотен ом-метров - каменные и калийные соли.

Приведенная весьма сжатая геологическая и электрическая характеристики соленосных отложений и условий их залегания в Предкарпатье свидетельствует о том, что поиски солей здесь сводятся к выявлению и картированию крутопадающих высокоомных пластов, перекрытых сверху гравелистыми наносами.

Несмотря на благоприятные физические предпосылки и кажущуюся простоту формализованной модели геоэлектрического разреза, ряд геологических задач при поисках и разведке калийных солей в Предкарпатье из-за сложности структуры солевых залежей, представленных частым чередованием пластов различного сопротивления, не решался обычными модификациями электрических методов, а только с помощью двусторонних дивергентных установок. Именно это обстоятельство, подтверждаемое многочисленными практическими примерами, определило необходимость разработки методики последних применительно к поискам солевых залежей, достаточно детально изложенной в работе [22].

Поэтому здесь рассмотрим лишь результаты электрических исследований вдоль одного профиля в пределах Ниневского месторождения калийных солей, расположенного в центральной части Предкарпатского соленосного бассейна. Месторождение относится к одному из первых, на которых опробовались дивергентные установки и поэтому наряду со съемкой вторых разностей потенциала здесь регистрировались и градиенты потенциала, а также выполнялись наблюдения методом комбинированного профилирования. В связи с этим профиль представляет определенный интерес, так как позволяет сопоставить и оценить данные различных установок (рис. 39).

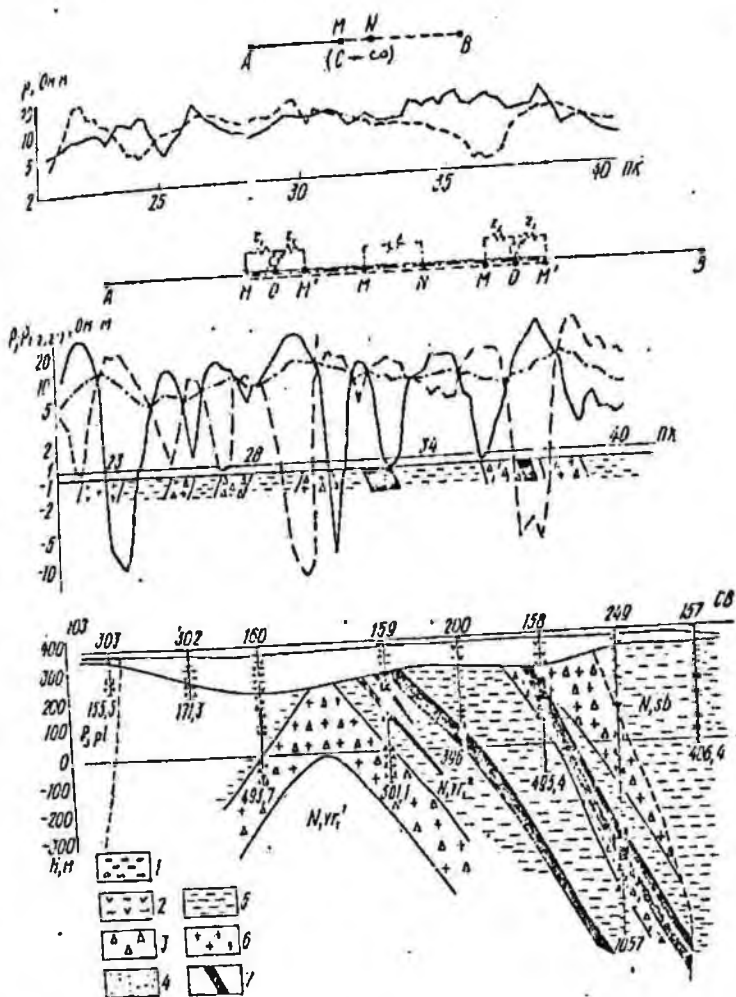


Рис. 39. Составление профильных электроразведочных и геологических данных на участке Нинев: 1 - галецья; 2 - гипсо-глинистая шпала; 3 - соленосная бречья; 4 - песчаник; 5 - аргиллит; 6 - галитовая порода; 7 - пласты калийных солей.

В первую очередь обращает на себя внимание высокая дифференциация графиков дивергентных установок по профилю и наличию многочисленных аномалий, характерных для контактов высокоомных и проводящих пластов. Сопоставление аномалий с геологическими данными показывает, что все они соответствуют характерные особенности геологического разреза. В юго-западной части профиля весьма отчетливо максимум гресса и минимум остаточных установок, соответствующих подовые высокоомного пласта, фиксируется линия надвига полициклического отложения на вортышевские, а в периферийной северо-восточной части профиля не менее четко — контакт вортышевских и стабильских отложений.

В толще вортышевских соленосных отложения выделяется в свою очередь еще ряд высокоомных и низкоомных пластов, связываемых на основании данных бурения с калийными солями, галитовой породой, соленосной брекчией, песчаниками и другими литологическими разностями. Выделенные аномалии вблизи скважин хорошо увязываются с геологическим разрезом, а в интервалах между ними позволяют существенно дополнить геологические построения.

Приведенные для сопоставления графики обычного среднего градиента, полученные параллельно на тех же разностях питающей линии и фиксирующие расплывчатые аномалиями только границы распространения вортышевских отложения и некоторые мощные соляные пласты в их толще, не могут ни в какой мере конкурировать с данными профилирования дивергентными установками. Заметно уступает последним и двусторонние графики комбинированного профилирования, которые хотя и дают ряд прямых и обратных пересечений, обычно связываемых с проводящими или высокоомными включениями, не позволяют оконтуривать их.

Заметим, что подобные четкие аномалии на кривых дивергентных установок получены и на соседних профилях. Это позволило построить корреляционную схему, которая не только хорошо согласуется с геологическими данными, а и существенно дополняет их в силу более густой сети электроразведочных профилей и пунктов наблюдений по сравнению с сетью скважин.

Приведенные данные свидетельствуют, с одной стороны, о хорошем соответствии аномалий с реальными геологическими условиями теоретически рассчитанным над идеализированными моделями, а с другой — подтверждают вытекающую из теоретических предпосылок повышенную разрешающую способность дивергентных установок и эффективность их применения для детальных исследований.

§ 2. КАРТИРОВАНИЕ УСТУПОВ КРИСТАЛЛИЧЕСКОГО ФУНДАМЕНТА ПОД НАНОСАМИ

Задача картирования рельефа пород кристаллического фундамента возникла в связи с изучением характера горстовых структур Припятского вала [23].

В пределах последнего близко к дневной поверхности под меловые отложения подходят кристаллические породы, а также перекрывающие или только окаймляющие их рифейские и нижнекембрийские осадочные и вулканогенные образования. Учитывая наличие среди перечисленных пород оруденения, приуроченных, как правило, к зонам рифейских и нижнепалеозойских разломов, изучение тектонического строения горстовых структур имеет первостепенное значение для выяснения перспектив их промышленной металлоносности. Резкое различие по сопротивлениям кристаллических и перекрывающих их осадочных пород создает благоприятные предпосылки для изучения рельефа фундамента электрическими методами.

Описанные в работе [23] исследования, в задачу которых входила разработка методики электроразведочных наблюдений, включали наряду с методом ВЗЗ электропрофилирование обычными и дивергентными установками. Объектом для постановки опытно-методических наблюдений было выбрано относительно хорошо разбуренное, по сравнению с остальными Ратненское горстовое поднятие.

Анализ полученных кривых ВЗЗ и сопоставления их с имеющимися буровыми данными и каротажными материалами показали, что высокоомными горизонтами в разрезе исследуемой территории, обуславливающими появление восходящих правых ветвей на кривых зондирования, могут служить только поверхности архейских кристаллических пород или мощных пластов базальтов волынской серии. Залегающие выше отложения полесской, волынской, валдайской и балтийской серий характеризуются примерно одинаковыми значениями удельных сопротивлений (30 - 50 Ом·м) и поэтому их можно объединить в один низкоомный горизонт. Сходными значениями удельных сопротивлений, колеблющимися в пределах от 30 - 40 до 70 - 80 Ом·м, характеризуются и меловые отложения, в связи с чем их не всегда удается отделить от подстилающих протерозойских и нижнекембрийских пород. Антропогенные породы отличаются крайним непостоянством удельных сопротивлений - от 20 - 30 Ом·м для глин и суглинков до десятков тысяч ом-метров для сухих песков.

на основании на характеристике всех полученных материалов, которые подробно описаны в [23], рассмотрим лишь в качестве примера фрагмент геоэлектрического разреза и сопоставим его с кривой геоэлектрической обобщенной и дивергентными установками, а также с графиками других параметров вдоль профиля, расположенного в нижней периферийной части Ратиснского поднятия (рис. 40).

В интервале ПК 87-88 на геоэлектрическом разрезе, по данным качественной интерпретации кривых ВЭЗ, отчетливо выделяется резкое погружение интрузивных пород кристаллического фундамента в виде ступени, выходящей свое отображение и на всех качественных построениях. Так, в частности, на разрезе каущихся сопротивлений в этом же интервале наблюдается резкий спад повышенных значений КС. Весьма наглядны также результаты наблюдений двусторонними дивергентными установками $I - M'_{111}, M'_{211}, M'_{311} - B$ с размещением питающих электродов по обе стороны от ступени и заключением ее внутри рабочего интервала. Значения экстремумов кривых КС, максимум прямой и минимум обратной установок, характерными для вертикальной ступени под наносами (рис. 30, 31), видимо фиксируется названное погружение пород фундамента. Замечательно, что больше таких интенсивных аномалий на графиках электропрофилирования не наблюдается и незначительными изломами в пересечениях кривых дивергентных установок фиксируются, по-видимому, неровности поверхности кристаллического фундамента, отмеченные по данным ВЭЗ.

Сравненное сопоставление наглядно показывает преимущества дивергентных установок перед методом срединного градиента, по результатам которого в общем тоже отмечаются неоднородности разреза, но в значительно сглаженном и ватушеванном виде.

Электроизмерительные построения хорошо увязываются с имеющимися гравиметрическими данными, хотя сеть их была примерно вдвое реже, чем электрометрических. В частности, на графике второй вертикальной производной силы тяжести, полученном с помощью трансформации наблюдений значений Δg , над ступенью наблюдается ее переход через нуль, что хорошо согласуется с характером теоретических графиков Δg над подобными неоднородностями [3].

Примечательный пример наряду с хорошим соответствием данных наблюдений различными методами показывает, что задача картирования ступеней для блоков кристаллического фундамента в геологических условиях Припятского вала и подобных им может успешно решаться с помощью наблюдений дивергентными установками.

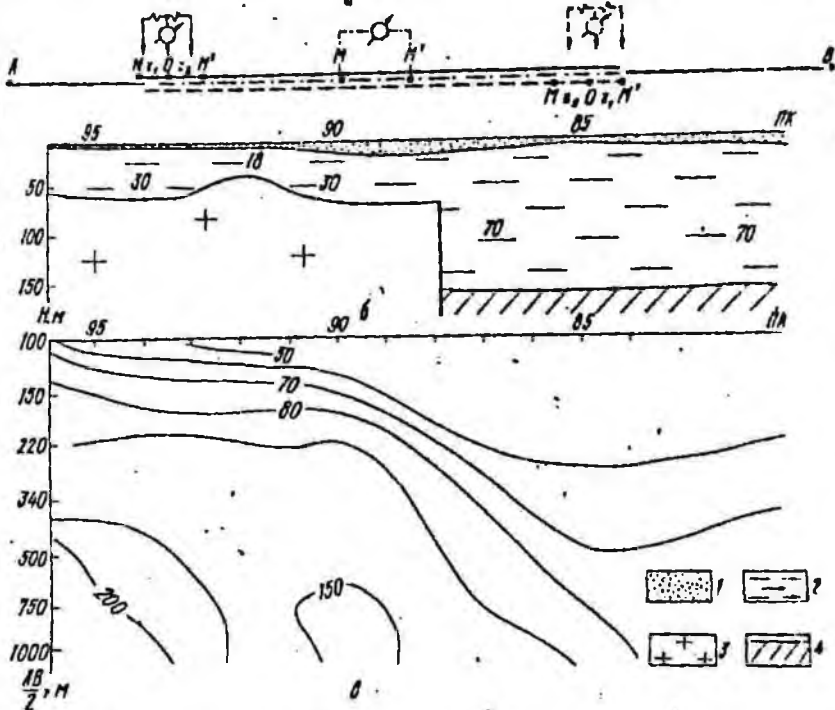
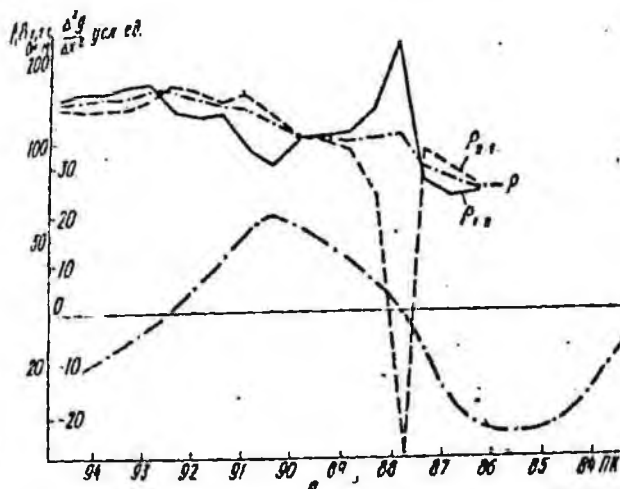


Рис. 40. Профилирование обычными $A \rightarrow MN \rightarrow B$ и дивергентными $A \rightarrow M_1 Q_1 \rightarrow M_2 \rightarrow B$ установками над уступом высокоомных пород: а - графики КС и Δg ; б - геоселектрический разрез, в - разрез ρ_{Σ} по данным ВЗЗ; 1 - верхний слой, 2 - проводящий горизонт, 3 - кристаллический фундамент, 4 - горизонт повышенного сопротивления.

Собразуясь с условиями местности для этих целей можно применять профильные и площадные наблюдения. Последние наиболее удобно выполнять методом съемки срединных разностей градиентов с отработкой при одном положении питающей линии - в центральной ее части серии параллельных профилей - "планшета".

§ 3. ИССЛЕДОВАНИЕ КАРСТОВЫХ ПОЛОСТЕЙ

Описываемые ниже наблюдения были выполнены в связи с внезапным карстовым провалом в центре с. Пески Львовской области и необходимостью уточнения предполагаемых контуров и направления возможного простиранья полостей. Данные этих наблюдений послужили основой проведения проверочных буровых работ и последующей оценки опасности карстовых явлений для близлежащих зданий, дороги и других объектов.

Опыт применения электроразведки в различных закарстованных районах страны свидетельствует, что карстовые полости могут проявляться в виде включений высокого или низкого сопротивления в зависимости от того, являются они сухими или обводнены и заполнены перестолбованными образованиями.

В связи с этим в первую очередь необходимо было установить характер карстовых пустот в с. Пески и особенности их проявления на графиках и кривых КС.

Участок исследований расположен в периферийной части юго-западной окраины Восточно-Европейской платформы в непосредственной близости от внешней зоны Предкарпатского прогиба.

В верхней части разреза под четвертичными отложениями залегают тортоновские глины, гипсоангидриты и песчаники. Естественно, гипсоангидриты, залегающие на глубинах 20 - 30 м, при средней мощности примерно 20 м и кажущихся сопротивлениях около 100 Ом·м являются высокоомным горизонтом, перекрытым сверху низкоомными (до 10 Ом·м) глинами и четвертичными отложениями повышенного сопротивления (20 - 50 Ом·м). Подстилающие гипсы песчаники также низкоомные и характеризуются сопротивлением порядка 10 - 20 Ом·м.

Как показали результаты наблюдений методом съемки срединного градиента над карстовыми пустотами, последние на кривых КС проявляются очень слабо и оконтурить их по этим данным невозможно (рис. 41).

И только электропрофилирование двусторонними дивергентными установками позволило выявить наличие карстовых полостей в районе основного (ПК 0) и некоторых бывших провалов (ПК 80); а также на участках, не имеющих внешних проявлений карстового процесса, но отмеча-

в две на скважинах аномальных зон. Скважины, вскрывавшие соответствующие карстовые полости, трещиноватые зоны и монолитные гипсы, полностью подтвердили геологическую трактовку аномальных зон и достоверность выполненных построений. Приведенный пример, таким образом, свидетельствует о том, что при изучении карстовых явлений, представляемых в большинстве случаев трудным для обычных методов задачей, существенную помощь могут оказать дивергентные установки.

§ 4. ИССЛЕДОВАНИЕ РАЗРЕЗОВ НЕФТЕГАЗОВЫХ МЕСТОРОЖДЕНИЙ

В связи с решением проблемы прямых поисков нефти и газа, которое представляет не только теоретический, но и практический интерес, в последнее время большое внимание уделяется изучению разрезов нефтегазовых месторождения различными геофизическими методами. Среди последних значительное место занимают электрометрические исследования, используемые для детального изучения разреза над нефтегазовыми залежами с целью оконтуривания последних благодаря их повышенным сопротивлением по сравнению с вмещающими породами [15] и уменьшению проводимости над сводами складок [26].

Ниже приводятся фрагменты подобных исследований, выполненных по отдельным профилям на площади Рудковского газового месторождения в Предкарпатье. Продуктивные горизонты здесь залегают на глубинах от 850 до 1200 м и перекрыты относительно монотонной низкоомной песчано-глинистой толщей, в нижней части которой залегают малоомный (30 - 50 м), но высокосиний гипсоангидритовый горизонт. Не касаясь результатов всего довольно обширного комплекса методов, рассмотрим только сопоставление обычных градиентных и дивергентных наблюдений методом вкраиваемого электрода с погружением одного заземления в скважину (установки $B1A \rightarrow M_{T1123} O_{T2113} M^*$) ниже уровня залежи и в поле неподвижной питающей линии AB . Так, на профиле I в интервале ПК 1.30-1.650 (рис. 42) четкими экстремумами и пересечением графиков установок $B1A \rightarrow M_{T1123} O_{T2113} M$ фиксируется низкоомная зона тектонического нарушения, совпадающего с контуром месторождения. Такого же типа аномалия, хотя и менее четко, прослеживается на соседнем профиле П. Повышенная дифференциация графиков дивергентных установок и четкость выделения на них аномалий по сравнению с градиентными измерениями хорошо видна и не требует специальных пояснений.

На рис. 43 четкими экстремумами на кривых КС прямых и обратных установок фиксируются контакты газовой залежи с вмещающими породами на разных гипсометрических уровнях у ПК 90 и 102. На графиках среднего градиента эти аномалии проявляются более сглаженными.

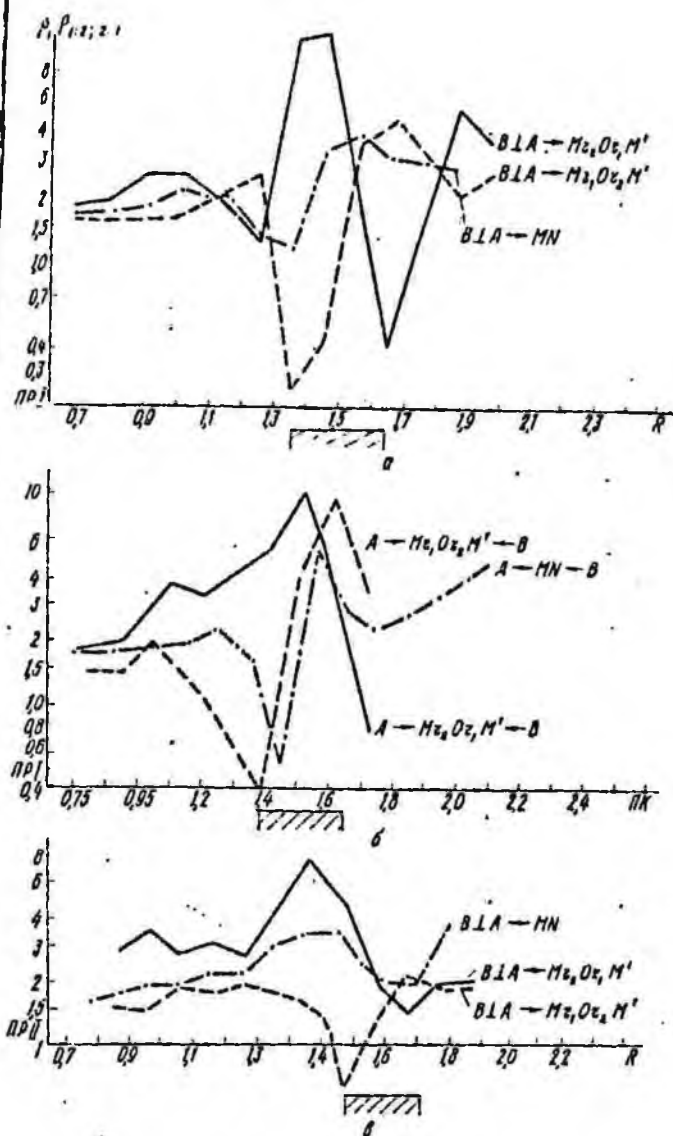


Рис. 42. Графики профилирования методом экранированного электрода (а, в) и среднего градиента (б) на Рудковском газовом месторождении. Заштрихована зона пониженных сопротивлений.

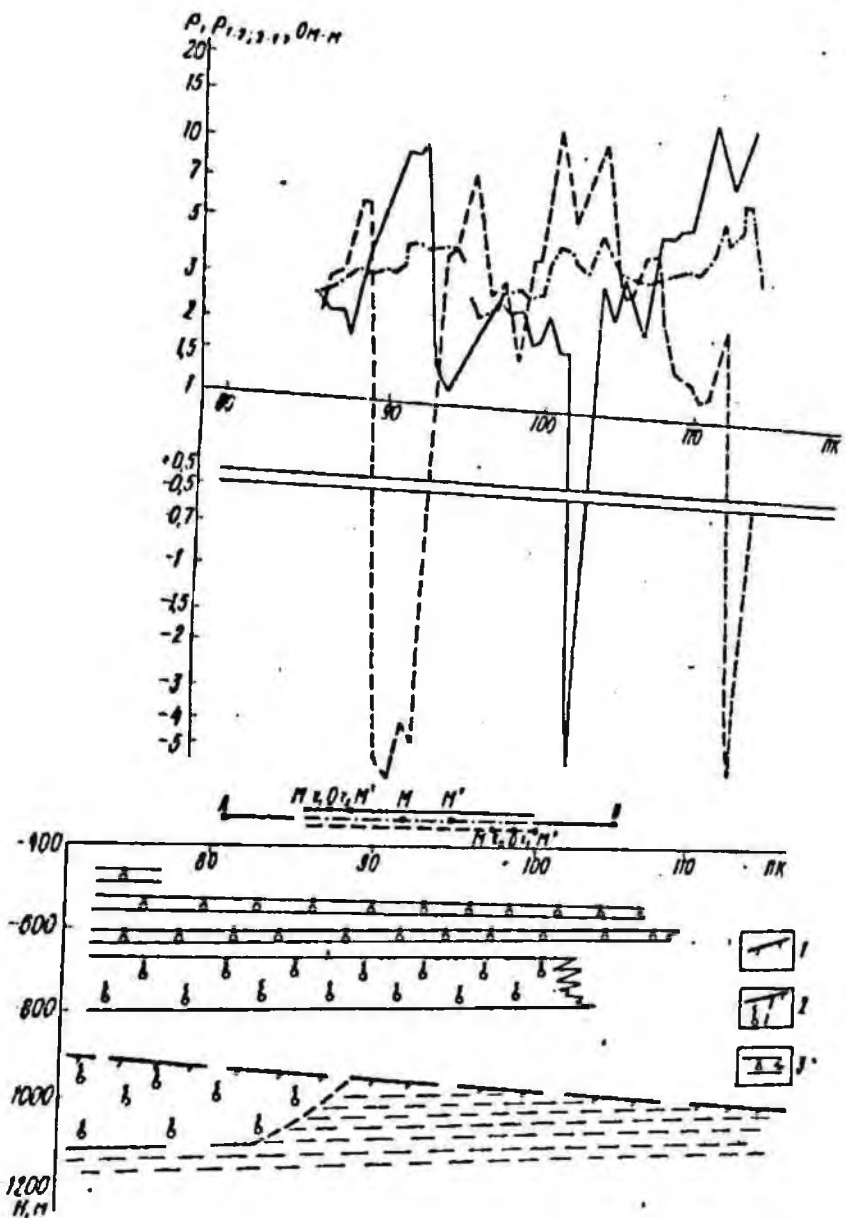


Рис. 43. Результаты профилирования дивергентными установками на Рудковском газовом месторождении:
 1 - гипсоангидритовый горизонт; 2 - гельвет-вorskская массивная залежь; 3 - пластовые залежи сармата.

Приведенные данные свидетельствуют о целесообразности применения дивергентных установок именно в тех случаях, когда детальность исследований и повышенная разрешающая способность играют первостепенную роль.

§ 5. ВЫЯВЛЕНИЕ ЕСТЕСТВЕННО-ПОЛЯРИЗОВАННЫХ ТЕЛ

С целью выяснения перспектив применения дивергентных установок в естественных электрических полях была проведена трансформация наблюдаемых графиков потенциала по одному из профилей Углянского участка (рис. 44). Профиль пересекает серпентинитовый массив, приуроченный к тектоническому нарушению, послужившему, по-видимому, каналом

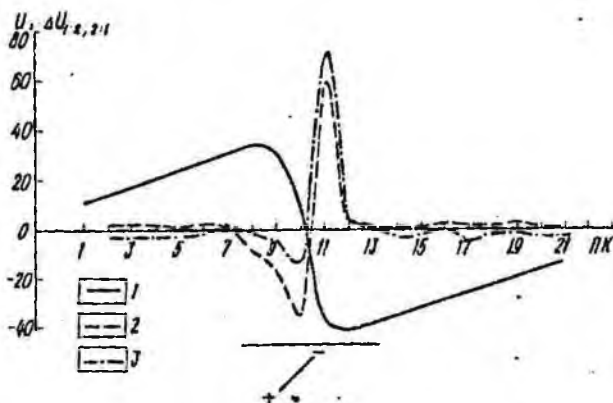


Рис. 44. Кривые потенциала в дивергентных установках над залежью сульфидно-никелевых руд:
 1 - $\Delta U_{1;2}$; 2 - $\Delta U_{2;7}$; 3 - U .

циркуляции гидротермальных растворов, обусловивших образование сульфидно-никелевых руд и соответственно аномалию естественного электрического поля. Поляризация, вероятно, наклонная, и поэтому графики ΔU дивергентных прямой и обратной установок почти повторяют друг друга. Вполне возможно, что пересечение графиков не получено из-за недостаточной точности исходных данных. Последние в виде графика потенциала также довольно отчетливо фиксируют аномальную зону. Тем не менее графики U дивергентных установок, переводящие пологопадающие участки кривой потенциала в горизонтальные, позволяют на этом

З а к л ю ч е н и е

Выполненные работы показали, что с целью повышения эффективности и достоверности детальных электрических исследований верхней части разреза целесообразно применять дивергентные установки как в естественных, так и искусственных электрических полях. Во всех случаях дивергентные установки характеризуются повышенной по сравнению с обычными *AMN* и дипольными осевыми *BAMN* установками дифференциацией кривых и локализацией аномальных зон, в связи с чем повышается четкость выявления неоднородностей и надежность геологического их истолкования.

Теоретически и экспериментально изучен характер графиков дивергентных установок в естественных электрических полях разного происхождения, а также над различными протяженными и локальными неоднородностями в искусственных электрических полях. Результаты теоретических и экспериментальных исследований дают наглядное представление о характере кривых дивергентных установок в аномальных естественных и искусственных электрических полях и являются основой истолкования полевых материалов в неоднородных средах.

Приведенные примеры практического опробования дивергентных установок в различных физико-геологических условиях наряду с подтверждением правильности выводов, вытекающих из теоретических расчетов, указывают на реальность и целесообразность их применения для решения разнообразных геологических и инженерно-геологических задач.

Применение дивергентных установок не связано с радикальными изменениями методики или техники наблюдений и вполне доступно любой электроразведочной партии или отряду, обеспеченному серийной измерительной аппаратурой ЭСК-1, АПЧ-1 или ИКС-50 при небольших размерах применяемых установок либо электроразведочной станцией любого типа при больших размерах установок и больших глубинах исследования.

Особенно эффективно и целесообразно применение дивергентных установок для картирования близлежащих неоднородностей с целью расчленения сложных аномалий по возмущающим объектам, т.е. там, где обычные электроразведочные методы не дают положительных результатов. В связи с этим следует рекомендовать более широкое опробование дивергентных установок в различных модификациях естественных и искусственных электрических полей и расширения круга решаемых с их помощью геологических задач.

Дальнейшее развитие и совершенствование исследований в области использования дивергентных установок должно быть направлено на повы-

шение помехоустойчивости измерительной аппаратуры, включая цифровую запись, и точности наблюдений как основы получения надежных и достоверных полевых материалов.

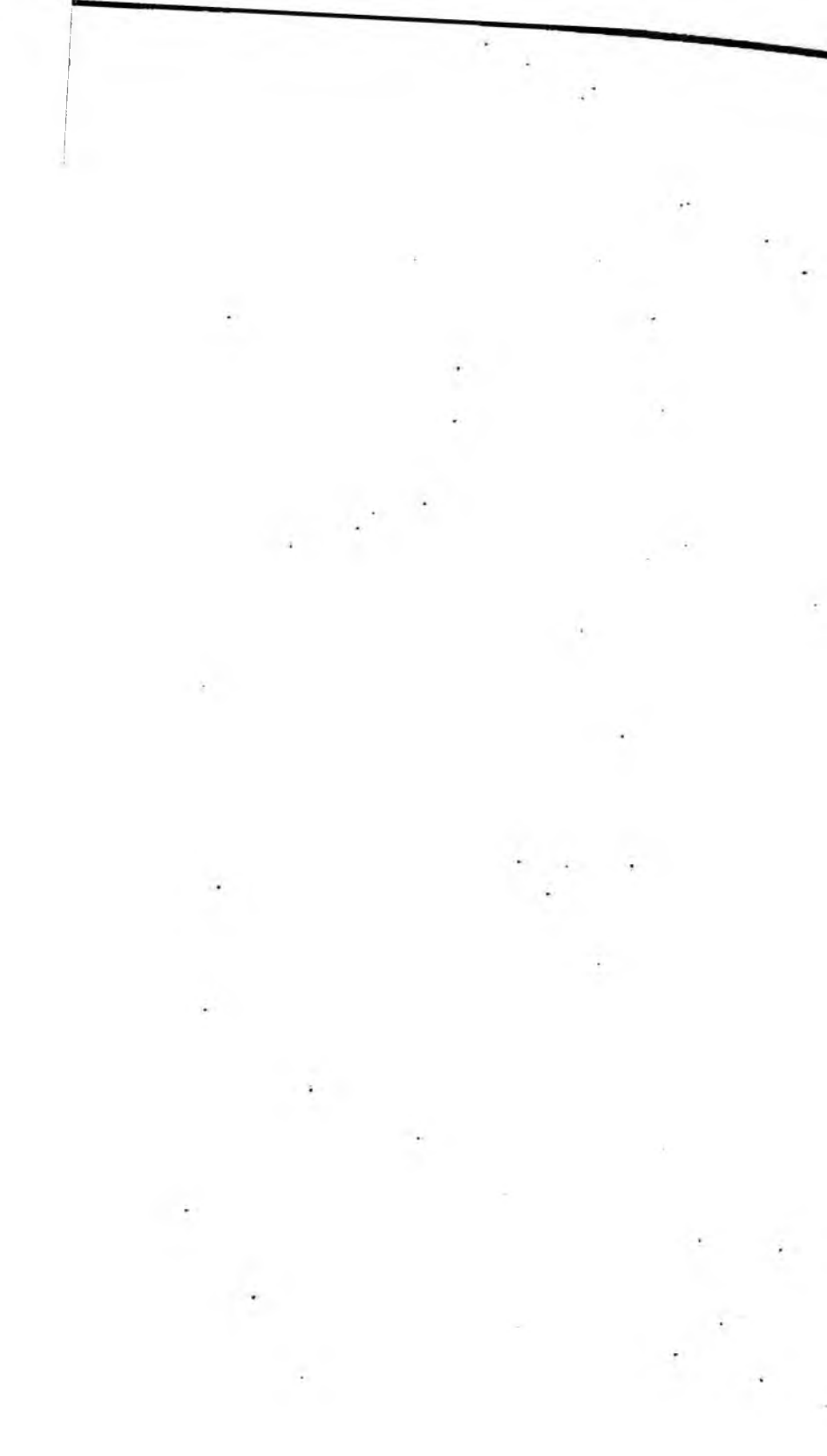
Вместе с тем необходимо развивать дальше теоретические основы и методику интерпретации получаемых данных, а также автоматизацию процесса истолкования их на базе использования ЭВМ.

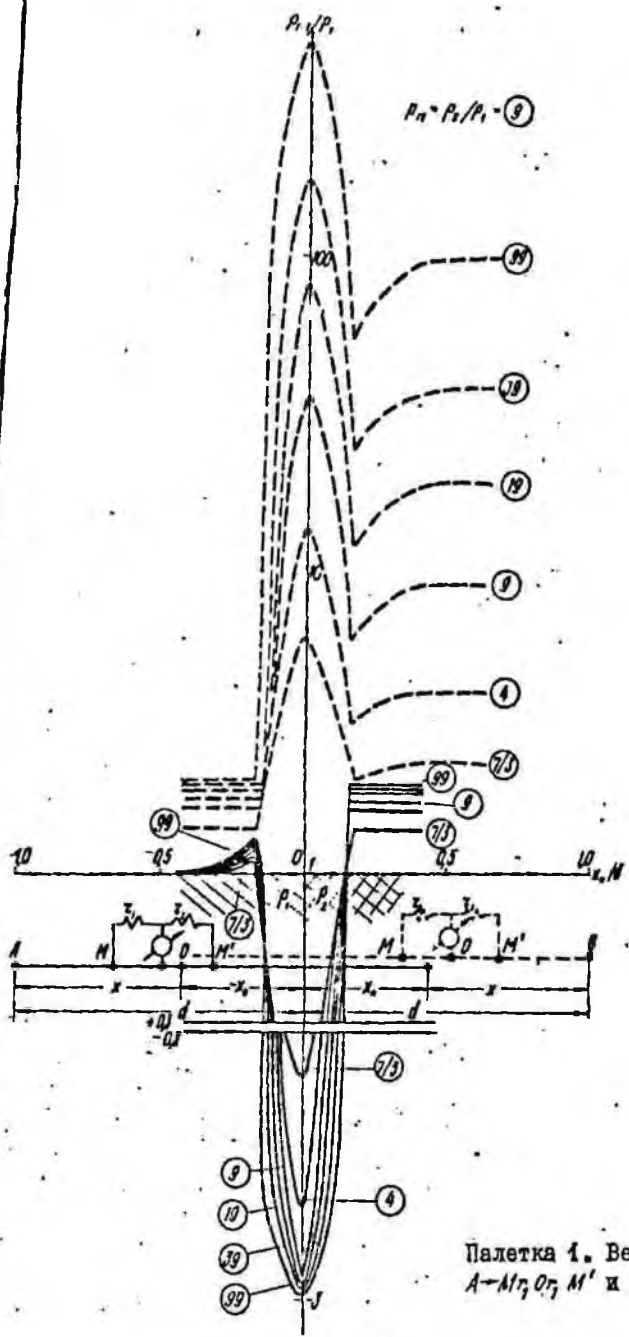
Все это позволит наметить новые пути повышения эффективности детальных электрометрических исследований при решении самых разнообразных геологических задач.

Приложение

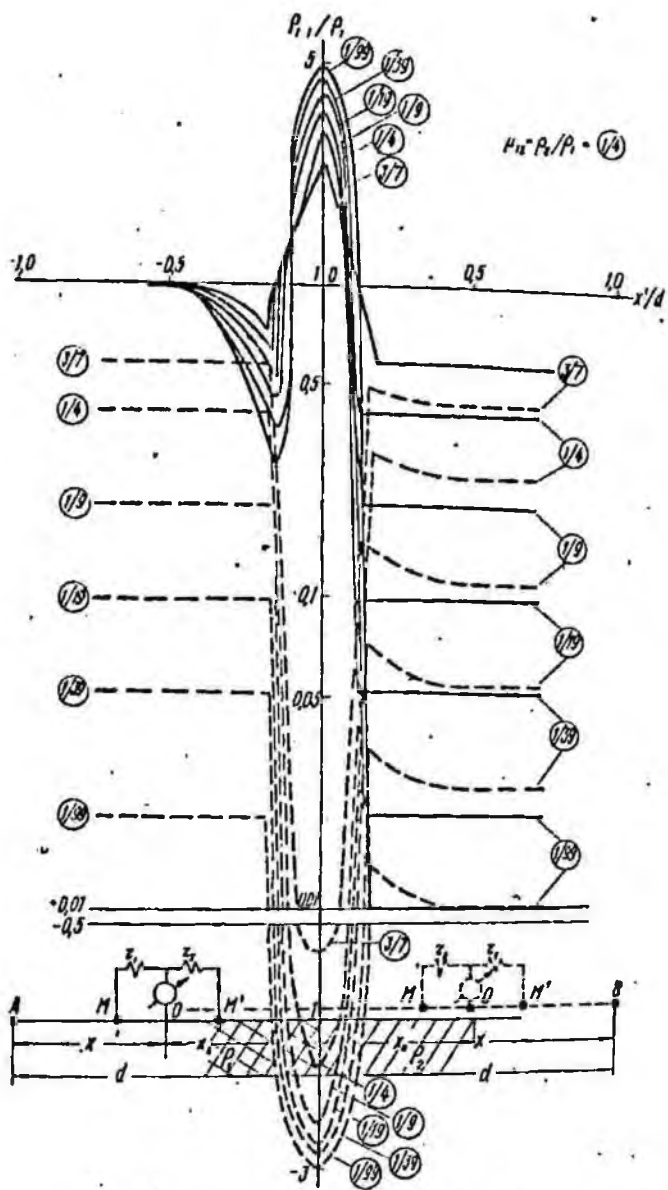
ПАЛЕТКИ

ТЕОРЕТИЧЕСКИХ КРИВЫХ
ДИВЕРГЕНТНЫХ УСТАНОВОК

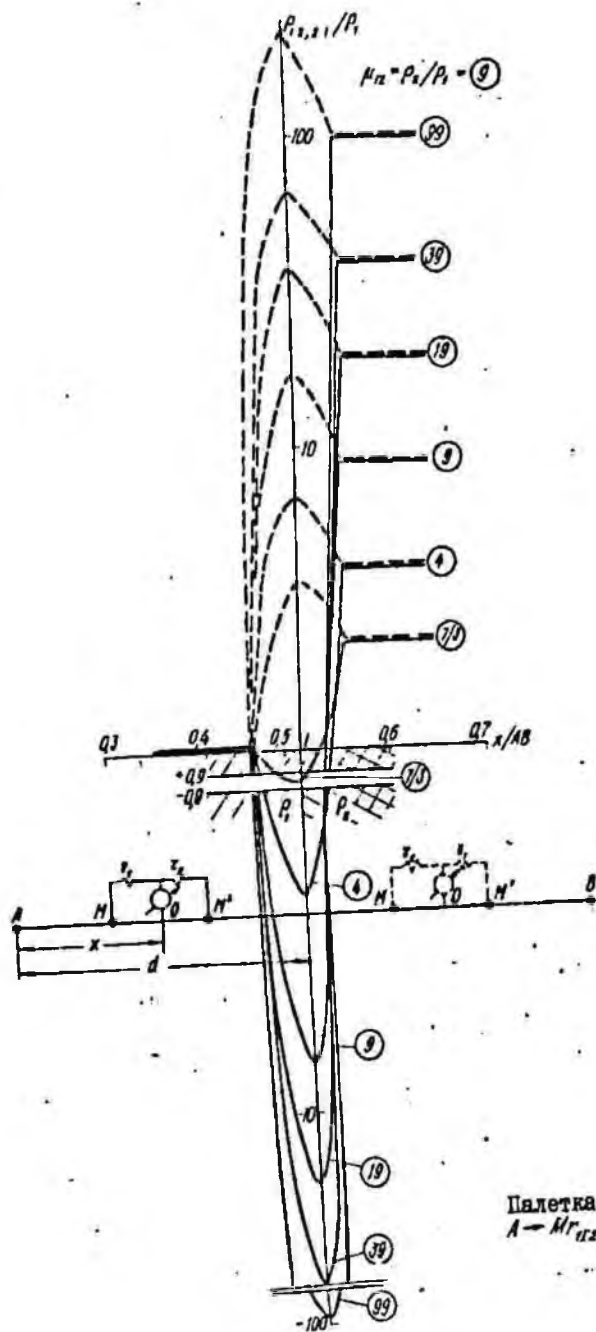




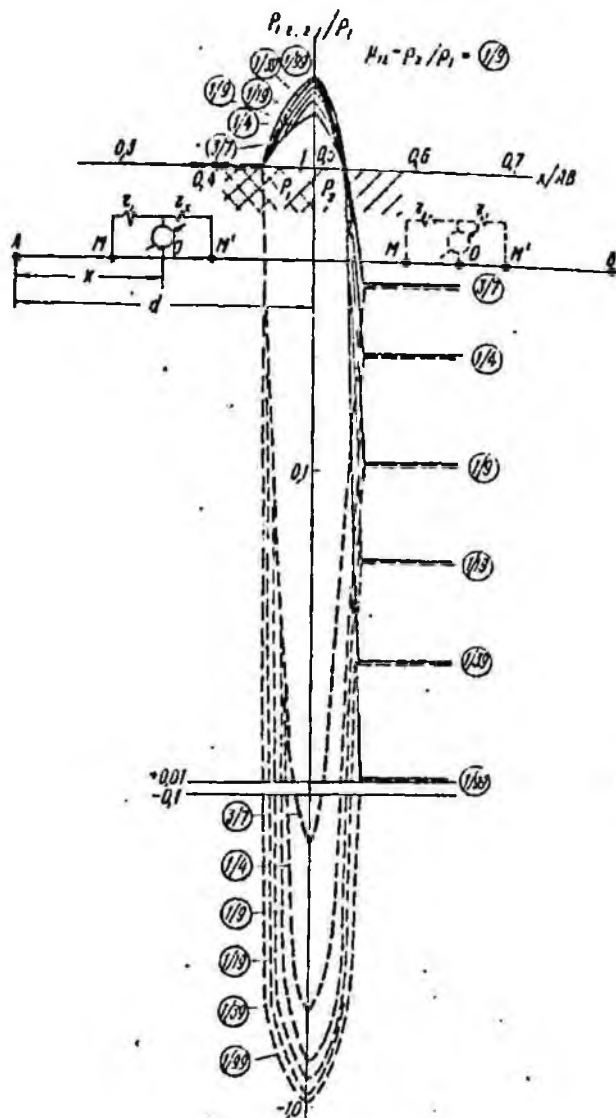
Палетка 1. Вертикальный контакт
 А-М; О; М' и М; О; М'-В.



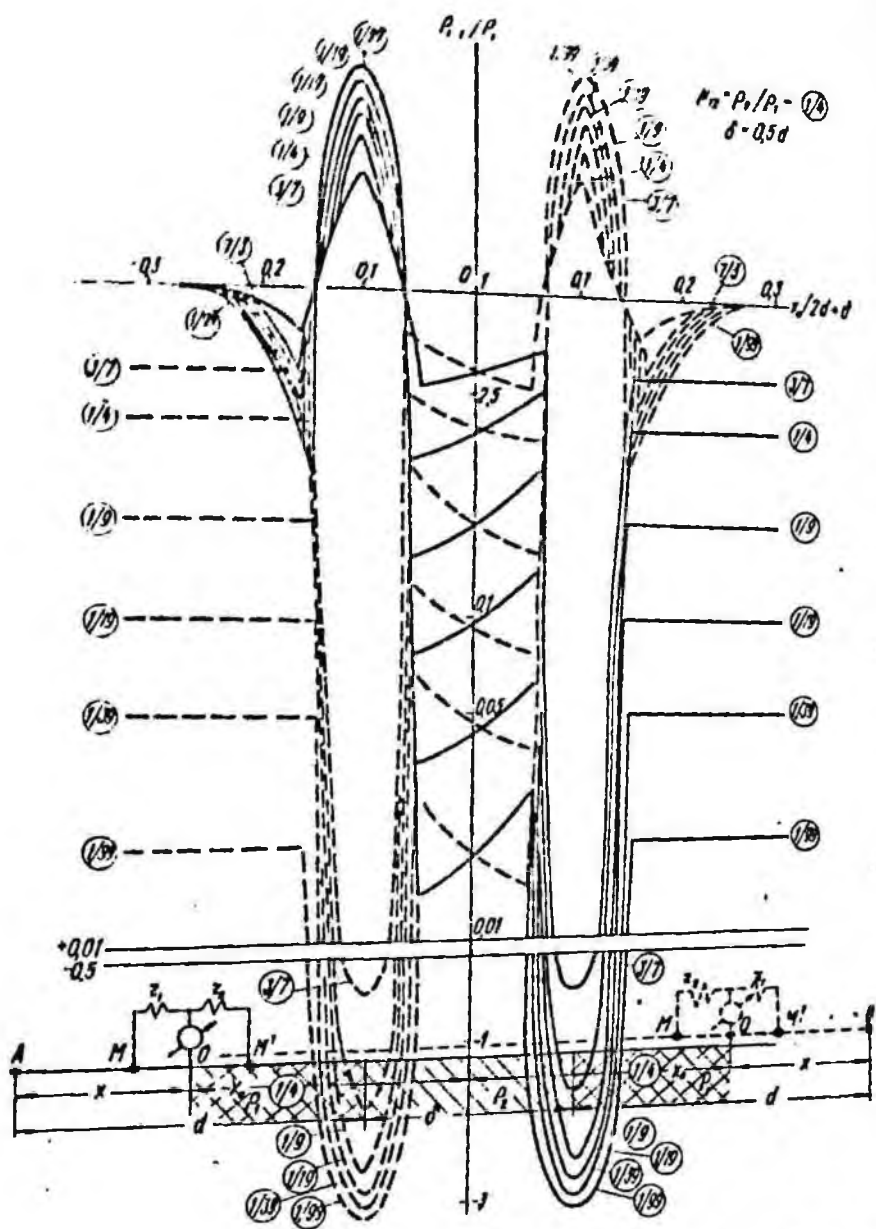
Палетка 2. Вертикальный контакт $A-Mr_1, O_1, M'$ и $Mr_2, O_2, M'-B$.



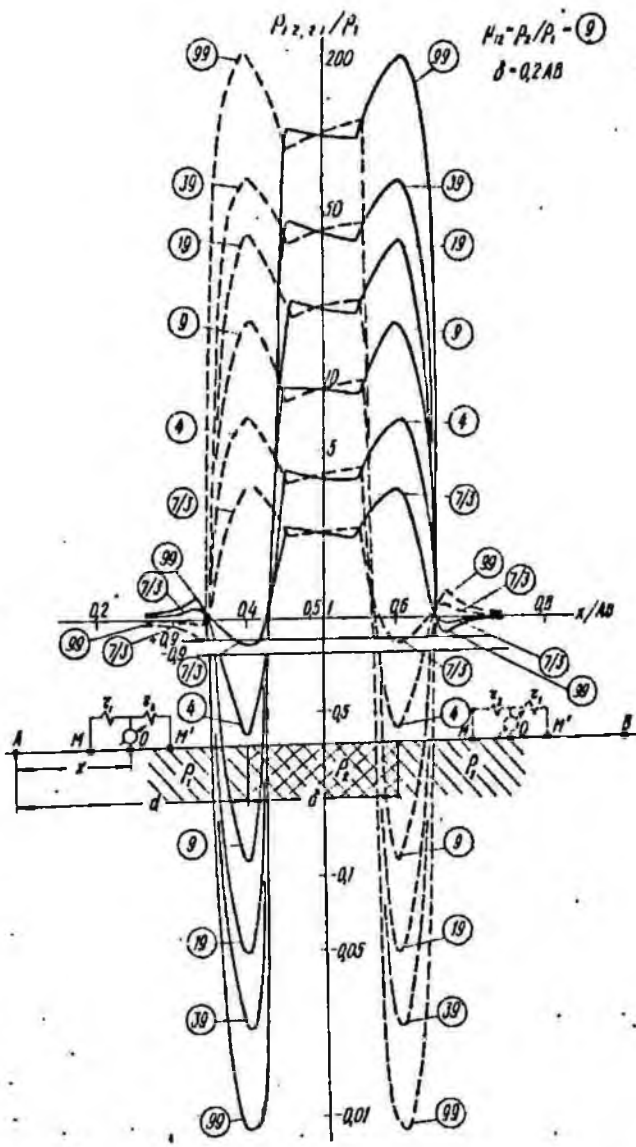
Палетка 3. Вертикальный контакт
 $A - M'_{1(2)}$ $0r_{2(1)}$ $M' - B$.



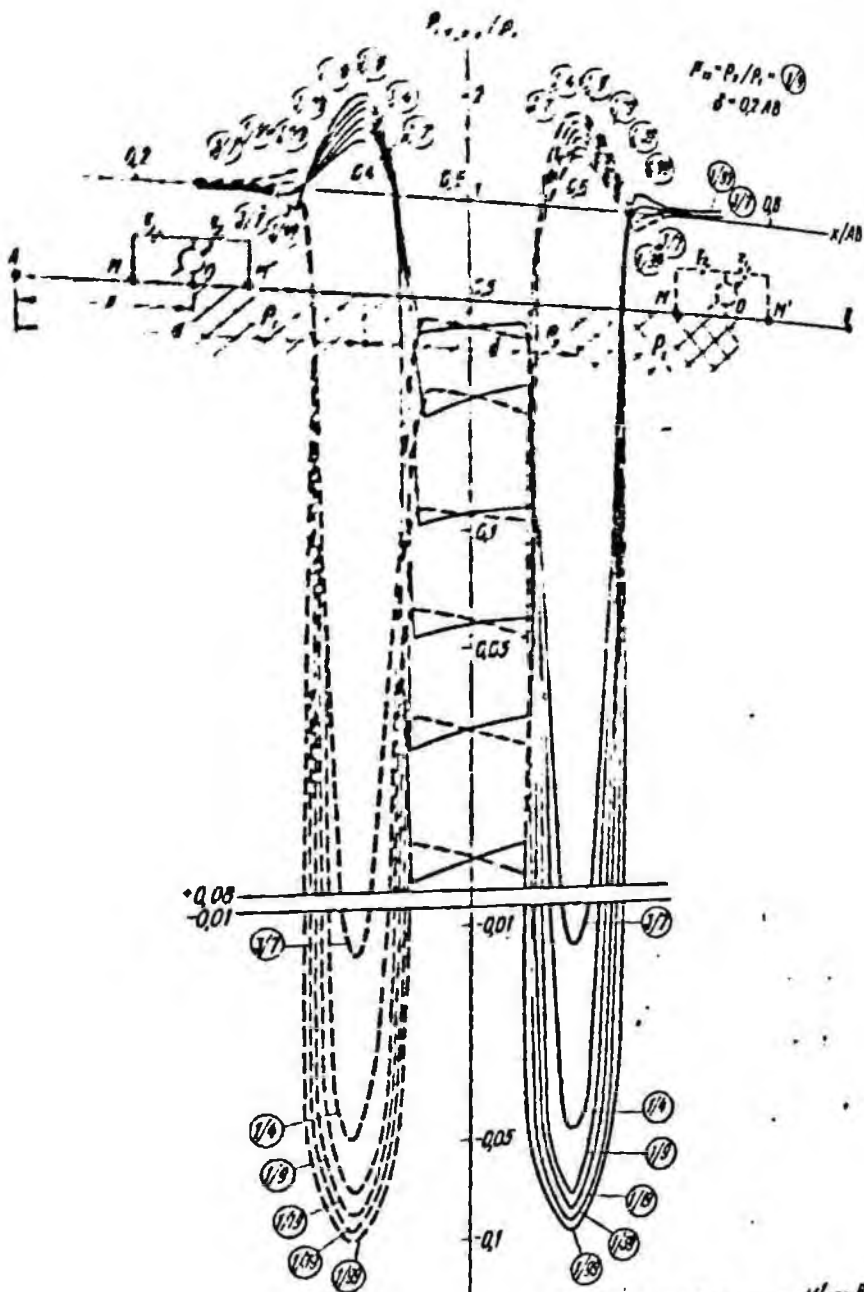
Палетка 4. Вертикальный контакт $A - M_{1,2,3} O_{1,2,3} M' - B$.



Палетка 6. Вертикальный низкоомный пласт $A \rightarrow M, O, M'$ и $M, O, M' \rightarrow B$.



Палетка 7. Вертикальный высокоомный пласт $A \rightarrow M_{r_{21}}^{D_{r_{21}}}$ $M' \rightarrow B$.



Листок 8. Вертикальный высокоомный пласт A - M_{12} \Sigma_{111}^{Dr} M' - B

Л и т е р а т у р а

1. Альпин Л.М. Дивергентные каротаж. - Прикл. геофизика, 1962, вып. 42, с. 192 - 211.
2. Альбом палеток электрического зондирования для разрезов с вертикальными наклонными и горизонтально-вертикальными контактами (ВК, НК и ГВК). 119 л.
3. Балабушевич И.А. Высшие производные потенциала силы тяжести и возможности их использования в геологической гравиметрии. К., Изд-во АН УССР, 1963. 267 с.
4. Белаш В.А. Влияние полусферической неоднородности удельного электрического сопротивления на результаты зондирования. - Геофиз. сборник, 1969, вып. 22, с. 109-112.
5. Бермуханов Ш.Б. Дифференциальная установка измерения вторых производных естественного электрического поля Земли. - Информ. сборник науч. исслед. работ Ин-та геол. наук АН ЧССР, 1974, с. 121-123.
6. Блох И.М. Электропрофилирование методом сопротивления. М., "Недра", 1971. 216 с.
7. Ведринцев Г.А. К теории электрических зондирования горизонтально-неоднородных сред. - Прикл. геофизика, 1960, вып. 26, с. 30-69.
8. Вишняков А.Э. Типовая электроразведочная аппаратура. Л., "Недра", 1967. 279 с.
9. Григорьева Н.П. Сравнение аномалия над проводящей сферой для различных установок метода постоянного тока. - В кн.: Геофизическая разведка рудных месторождений. М., 1953, с. 83 - 122.
10. Дахнов В.Я. Электрическая разведка нефтяных и газовых месторождений. М., Гостоптехиздат, 1953. 497 с.
11. Дахнов В.Я. Интерпретация результатов геофизических исследований разрезов скважин. М., Гостоптехиздат, 1955. 492 с.
12. Лубов Р.И. Моделирование геоэлектрических разрезов на электропроводной бумаге. - Бюл. науч.-техн. информации, 1958, № 3 (15), с. 42-47.
13. Заборовский А.И. Электроразведка. М., Гостоптехиздат, 1963. 423 с.
14. Инструкция по электроразведке. Ч. 1. М., Госгеолтехиздат, 1961. 152 с.
15. Киричек М.А., Круглова Э.Д., Яковлев А.А. и др. Основные направления и результаты непосредственных поисков залежей нефти и газа электроразведкой. - В кн.: Разведочная геофизика СССР на рубеже 70-х годов. М., 1974, с. 171 - 178.
16. Кролевыч Н.Г., Цекон Г.Д. Теоретические кривые электрического зондирования над наклонным контактом двух сред (палетки НК) - Прикл. геофизика, 1960, вып. 24, с. 54 - 71.
17. Мадовично А.К., Таруница О.Л. Высшие производные гравитационного потенциала и их применение при геологической интерпретации аномалия. М., "Недра", 1972. 152 с.
18. Саковцев Г.П. Некоторые вопросы метода ВЗЗ в связи с применением его при поисках рудных тел конечных размеров. - В кн.: Вопросы разведочной геофизики. М., 1953, с. 51 - 63.
19. Сапожников В.М., Ермаков С.Б. Моделирование геоэлектрических разрезов в плоской двухслойной электрической ванне. - Изв. вузов. - Горн. журн., 1966, № 12, с. 3-5.
20. Сапожников В.М., Сысов С.С., Ивин В.Н. Приставка к аппаратуре АНЧ-1 для определения полярности измеряемого сигнала. - Разведочная геофизика, 1968, вып. 30, с. 83 - 84.
21. Салузак Я.С. Высшие производные электрического потенциала в геофизической разведке. К., "Наук. думка", 1967. 154 с.
22. Салузак Я.С., Шамотко В.И., Салузак А.Ф. Электрична розвідка покладів солей та розсолів у Передкарпатті. К., "Наук. думка", 1971, 176 с.

23. Сапулак Я.С., Кравченко А.П., Кравченко В.А. К методике изучения горстовых структур Припильского вада электрическими методами. - В кн.: Материалы Международного геофизического года. Информ. сб., т. II. К., 1967, с. 58 - 66.
24. Семенов А.С. Электроразведка методом естественного электрического поля. Л., "Недра", с. 360.
25. Семенов А.С., Турчанинов Л.В., Бархатов Д.Р. Метод среднего градиента при крупномасштабном геологическом картировании. - Труды ВИРГ. Вопр. рудной геофизики, 1961, вып. 2, с. 15 - 35.
26. Сидоров В.А., Тиклаев В.В. Электроразведка зондированными становлением поля в ближней зоне. Саратов, 1969. 68 с.
27. Скальская И.П. Поле точечного источника, расположенного на поверхности Земли над наклонным пластом. - Журн. техн. физики, 1948, т. 18, вып. 10, с. 1242-1254.
28. Тарасов Г.А. Электрическое поле над комплексом вертикально поляризованных проводящих сфер. - Труды ВИРГ. Вопр. рудной геофизики, 1961, вып. 2, с. 61 - 67.
29. Хмелевский В.К. Основной курс электроразведки. Ч. I. М., Изд-во Моск. гос. ун-та, 1971, 245 с.
30. Шамотко В.И. Методика поисков залежей солей электрическими методами во внутренней зоне Предкарпатского прогиба. Автореф. канд. дис. Днепропетровск, 1975. 27 с.
31. Шемякин Е.А. Сравнение аномалий над проводящим шаром для различных методов наземной электроразведки. - Прикл. геофизика, 1972, вып. 65, с. 96 - 110.
32. Якубовский В.В. Электроразведка. М., "Недра", 1973, 302 с.
33. Dziwiel J. Wzrost i rozwój powziękania złóż węglowodorów w okresie o powiększającej się powierzchni pomiaru efektu ich naturalnej polaryzacji elektrostatycznej. - Nafta, 1975, 31, № 5, s. 193-195.

О г л а в л е н и е

Предисловие	7
Глава 1. ОСОБЕННОСТИ РЕГИСТРИРУЕМЫХ ДИВЕРГЕНТНЫМИ УСТАНОВКАМИ ВЕЛИЧИН И СВЯЗИ ИХ С ОБЫЧНЫМИ УСТАНОВКАМИ.....	9
§ 1. Определение и общие свойства дивергентных установок	9
§ 2. Типы дивергентных установок. Изображение результатов наблюдений и оценка их разрешающей способности	14
§ 3. Связь кажущихся сопротивлений, определяемых с помощью дивергентных и обычных установок	19
Глава 2. ДИВЕРГЕНТНЫЕ УСТАНОВКИ В ЕСТЕСТВЕННЫХ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ ПОЛЯХ	26
§ 1. Естественно поляризованные тела	26
Наклонно поляризованная сфера	26
Вертикально поляризованная сфера	31
Наклонно поляризованный цилиндр	33
Вертикально поляризованный цилиндр	35
Вертикально поляризованный тонкий пласт	36
Вертикальная столбобразная залежь	38
Вертикальная пластообразная залежь	40
Комплекс естественно поляризованных тел	42
§ 2. Поля фильтрационного происхождения	47
§ 3. Поля диффузионно-адсорбционного происхождения	51
§ 4. Поля гальванокоррозии трубопроводов	53
Глава 3. ДИВЕРГЕНТНЫЕ УСТАНОВКИ В ИСКУССТВЕННЫХ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ ПОЛЯХ	57
§ 1. Метод сопротивлений	57
Вертикальный контакт	57
Две вертикальные грани раздела	69
Горизонтально-вертикальные контакты	78
Горизонтально-вертикальный контакт с одной вертикальной границей раздела (ГВК-I)	78
Горизонтально-вертикальный контакт с двумя границами раздела (ГВК-II)	96
Наклонный контакт	95
Локальные неоднородности	99
Погруженная сфера	100
Полусферическая впадина	105
§ 2. Метод заряженного тела	111
Оконтуривание рудных тел	111
Определение направления и скорости движения подземных вод	116
Глава 4. МЕТОДИКА ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫХ ЛАБОРАТОРНЫХ И ПОЛЕВЫХ НАБЛЮДЕНИЙ ДИВЕРГЕНТНЫМИ УСТАНОВКАМИ И ИНТЕРПРЕТАЦИЯ ПОЛУЧАЕМЫХ МАТЕРИАЛОВ	119
§ 1. Методика и некоторые результаты моделирования	119
§ 2. Методика и техника полевых наблюдений дивергентными установками	129
Аппаратура и оборудование	130
Методика полевых наблюдений	133
§ 3. Интерпретация полевых материалов	145
Обработка и представление данных наблюдений	145
Некоторые приемы интерпретации	147
ГЛАВА 5. ПРИМЕРЫ ПРАКТИЧЕСКОГО ПРИМЕНЕНИЯ ДИВЕРГЕНТНЫХ УСТАНОВОК ДЛЯ РЕШЕНИЯ РАЗЛИЧНЫХ ГЕОЛОГИЧЕСКИХ ЗАДАЧ	151
§ 1. Поиски залежей калийных солей в Предкарпатье	151

§ 2. Картирование уступов кристаллического фундамента под наносами	155
§ 3. Исследования карстовых полостей	158
§ 4. Исследования разрезов нефтегазовых месторождений	160
§ 5. Вытвление естественно-поляризованных тел	163
Заключение	165
Приложение	167
Литература	177

Ярослав Станиславович Салуцак

ДИВЕРГЕНТНАЯ ЭЛЕКТРОРАЗВЕДКА

Печатается по постановлению ученого совета
Львовского филиала математической физики
Института математики АН УССР

Редактор Н.Я. Соколова
Оформление художника С.В. Назарова
Художественный редактор И.П. Савицкая
Технический редактор И.М. Баяджиева
Корректор Н.Н. Щеглова

Информ. бланк № 690

Подп. в печ. 13.07.77. Бр 00728. Формат 60x84 1/16. Бумага офс.
№ 2. Усл. печ. л. 10,93. Уч.-изд. л. 10,71. Тираж 800 экз.
Заказ 7-544. Цена 1 руб. 10 коп.

Издательство "Наукова думка". 252601, Киев, ГСП, Репина, 3.
Киевская книжная типография научной книги Республиканского
производственного объединения "Полиграфкига" Госкомиздата УССР.
252004, Киев-4, Репина, 4.



І руб. 10 коп.

« НАУКОВА ДУМКА »