

В. А. КОМАРОВ

# ЭЛЕКТРОРАЗВЕДКА МЕТОДОМ ВЫЗВАННОЙ ПОЛЯРИЗАЦИИ

Издание второе,  
переработанное и дополненное



Ленинград «Недра»  
Ленинградское отделение  
1980

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Абрамович Л. И.* Использование геофизических методов при поисках и разведке золоторудных месторождений в Северном Казахстане. — В кн.: Геофизические исследования в Казахстане. Алма-Ата, Казахстан, 1965, с. 158—168.
2. *Аверин О. К., Князев Л. Ф.* Использование методов ВЭЗ и ВЭЗ-ВП при поисках редкометаллических россыпей. — Разведка и охрана недр, 1971, № 8, с. 51—55.
3. *Алахверди Н. Г.* О применении метода вызванной поляризации при детальной разведке месторождения самородной меди по данным зарубежной печати. — Методика и техника разведки, 1967, № 59, с. 100—104. (ОНТИ ВИТР).
4. *Альмуханбетов Д., Кульбаев Н.* Опыт применения метода вызванной поляризации на медном месторождении Уйтас. — Вестн. АН КазССР, 1963, № 5, с. 45—50.
5. *Аппаратура* для проведения фазовых измерений в методе ВП на переменном токе/Ю. А. Аладинский, Л. З. Бобровников, В. П. Мельников, В. А. Попов. — Изв. вузов. Сер. Геология и разведка, 1968, № 6, с. 155—157.
6. *Арутюнян Г. В., Бадалян С. В., Гамоян В. Б.* Использование горизонтальных скважин подземного бурения при комплексных электроразведочных исследованиях. — Разведка и охрана недр, 1969, № 2, с. 37—41.
7. *Арутюнян Г. В., Бадалян С. В., Газарян Г. О.* Применение методов подземной геофизики на Дастакертском медно-молибденовом месторождении (АрмССР). — Изв. вузов. Сер. Геология и разведка, 1971, № 4, с. 127—134.
8. *Астраханцев Г. В.* О связи диэлектрической проницаемости и поляризуемости горных пород. — Изв. АН СССР. Сер. геофиз., 1962, № 12, с. 1802—1803.
9. *Астраханцев Г. В., Улитин Р. В.* Комплексная электропроводность горных пород на звуковых частотах и способы ее изучения в полевых условиях. — В кн.: Электрометрия при поисках сульфидных месторождений. Свердловск, 1968, с. 41—47. (Труды Ин-та геофизики УФАИ СССР).
10. *Базаров В. Н., Гольденберг Е. С., Шумаев А. Т.* Геофизические методы при поисках и изучении ртутного и сурьмяно-ртутного оруднения в Центральном Таджикистане. — Вопр. рудн. геофизики в Казахстане, 1973, № 6, с. 262—280. (Труды Казфилиала ВИРГ).
11. *Бабенков В. Е.* Применение скважинного варианта метода вызванной поляризации на медноколчеданных месторождениях Южного Урала. — В кн.: Применение метода вызванной поляризации при поисках рудных месторождений. М., Недра, 1964, с. 94—96.
12. *Бадалян С. В.* Опыт применения подземного варианта метода вызванной поляризации на Ахтальском месторождении. — Изв. АН АрмССР. Сер. Науки о Земле, 1965, т. 18, № 5, с. 65—68.
13. *Бадалян С. В.* Рудничный вариант и методика вызванной поляризации. — Методика и техника разведки, 1967, № 69, с. 95—99. (ОНТИ ВИТР).
14. *Бадалян С. В.* Возможности и особенности применения метода вызванной поляризации в рудничных условиях. Шахтно-рудничная геофизика. — Вопр. развед. геофизики, 1968, № 7, с. 87—88.
15. *Бадалян С. В., Ванцян Г. М., Газарян Г. О.* О геофизических поисках глубокозалегающих рудных тел на колчеданных месторождениях Армении. — Изв. АН АрмССР. Сер. Науки о Земле, 1967, т. 20, № 5—6, с. 96—103.
16. *Бадалян С. В., Матвеев А. Ш.* Некоторые данные сравнительного изучения месторождений Севано-Амасийского рудного пояса методом вызванной поляризации. — Изв. АН АрмССР. Сер. Науки о Земле, 1969, т. 22, № 1, с. 35—42.
17. *Базаров В. Н., Степанов И. П.* Методика и результаты геолого-геофизических исследований при геологической съемке и поисках в Центральном Таджикистане. — В кн.: Геофизические исследования при геологическом картировании. Алма-Ата, 1968, с. 100—106.
18. *Балашев А. Н.* Электрические свойства горных пород и руд Карамазара. — Бюл. науч.-техн. информ., 1966, № 60, с. 30—40. (ОНТИ ВИЭМС).
19. *Балашев А. Н.* Некоторые результаты моделирования скважинных вариантов метода вызванной поляризации. — Методика и техника разведки, 1967, № 59, с. 77—87. (ОНТИ ВИТР).
20. *Балашев А. Н., Зимкин И. Д., Сайганов Э. А.* Условия применения и эффективность метода вызванной поляризации в Карамазаре. — Методика и техника разведки, 1965, № 49, с. 135—142. (ОНТИ ВИТР).
21. *Белаш В. А.* Применение метода вызванной поляризации в Рудном Алтае. — Методика и техника разведки, 1960, № 23, с. 34—39. (ОНТИ ВИТР).
22. *Белаш В. А.* Геологические возможности применения метода вызванной поляризации для поисков сульфидных полиметаллических месторождений на примере Рудного Алтая. — В кн.: Состояние и перспективы развития разведочной геофизики. М., Гостоптехиздат, 1961, с. 175—177.
23. *Белаш В. А.* О некоторых способах интерпретации результатов наблюдений по методу вызванной поляризации. — Геология и геофизика, 1961, № 7, с. 90—95.
24. *Белаш В. А.* Интерпретация результатов наблюдений по методу ВП над вертикальными и крутопадающими пластами. — Геология и геофизика, 1964, № 7, с. 41—54.
25. *Белаш В. А.* О возможностях скважинных измерений методом вызванной поляризации с азимутальной установкой. — Развед. геофизика, 1967, вып. 23, с. 44—50.
26. *Белаш В. А.* О спаде потенциалов вызванной поляризации во времени. — Геофизика и астрономия, 1967, № 11, с. 113—118.
27. *Белаш В. А., Панасевич А. М.* Применение метода вызванной поляризации на Рудном Алтае. — В кн.: Применение метода вызванной поляризации при поисках рудных месторождений. М., Недра, 1964, с. 59—65.
28. *Берн Ф., Шерер Д., Снайсер Г.* Справочник для геологов по физическим константам. М., ИЛ, 1949. 304 с.
29. *Бобровников Л. З.* Радиотехника и электроника. 2-е изд., перераб. и доп. М., Недра, 1974. 360 с.
30. *Блох И. М.* Электропрофилирование методом сопротивлений. М., Недра, 1971. 216 с.
31. *Болковой Б. И., Кривопапов Ю. И.* Применение метода вызванной поляризации на месторождениях юго-западных отрогов Чаткальского хребта. — В кн.: Применение метода вызванной поляризации при поисках рудных месторождений. М., Недра, 1964, с. 119—125.
32. *Бродовой В. В., Анашин Ю. Ф.* Геофизические исследования при геологическом картировании масштаба 1:50 000 в полукрытых районах Казахстана. — Вопр. рудн. геофизики в Казахстане, 1968, № 2, с. 3—14. (Труды Казфилиала ВИРГ).
33. *Бронштейн В. Б.* Геофизические исследования при геологическом картировании закрытых площадей Воронежской антеклизы. — В кн.: Геофизические исследования при геологическом картировании. Алма-Ата, 1968, с. 118—121.
34. *Булашевич Ю. П.* Расчет поля вызванных потенциалов для рудных тел сферической формы. — Изв. АН СССР. Сер. геофиз., 1956, № 5, с. 504—512.
35. *Булашевич Ю. П.* Принцип подобия при моделировании поляризации рудных тел, вызываемой током. — Труды горно-геол. ин-та УФАИ СССР, 1957, вып. 30 (Геофиз. сб. № 2), с. 53—59.
36. *Бурсиан В. Р.* Теория электромагнитных полей, применяемых в электро-разведке. 2-е изд., испр. и доп. Л., Недра, 1972. 368 с.
37. *Бухгейм В.* Применение метода ВП на рудных месторождениях Швеции \*. — Бюл. науч.-техн. информ., 1958, № 2, с. 48—52. (ОНТИ ВИЭМС).
38. *Бухгейм В., Мальмквист Д.* Применение метода вызванной гальванической поляризации на месторождениях сульфидных руд района Шеллефте

\*.Перевод на русский язык статьи, оригинал которой указан в списке иностранной литературы.

- в Северной Швеции \*. — Методы развед. геофизики (из зарубежных журналов), 1958, с. 1—15. (ОНТИ ВИМС).
39. Ваньян Л. Л., Морозова Г. М., Ложеницына Л. В. О теоретических критериях метода вызванной поляризации. — Геология и геофизика, 1961, № 10, с. 118—123.
40. Вендельштейн Б. Ю. Опыт выделения пластов бурого угля в Подмосковном угольном бассейне. — Разведка недр, 1951, № 3, с. 27—32.
41. Вендельштейн Б. Ю. Электролитический каротаж при разведке месторождений угля. — Разведка недр, 1952, № 3, с. 35—42.
42. Вешев А. В. Электропрофилирование на постоянном и переменном токе. Л., Недра, 1965. 476 с.
43. Вигдорович Д. А. Комплексная методика глубинных поисков скрытых и погребенных сульфидных месторождений. — Методика и техника разведки, 1967, № 58, с. 90—100. (ОНТИ ВИТР).
44. Вигдорович Д. А., Зверев Р. Р., Рысс Ю. С. Комплексная методика поисков глобализирующих месторождений в закрытых районах Рудного Алтая. — Методика и техника разведки, 1965, № 53, с. 5—11. (ОНТИ ВИТР).
45. Виллер Г. А., Пишпарева Н. А., Старостин Ю. Б. Применение комплекса скважинных методов на месторождении Учкошкон. — Методика и техника разведки, 1970, вып. 72, с. 18—21. (ОНТИ ВИТР).
46. Влияние плотности тока и концентрации электролита на вызванную поляризацию сульфидных минералов/Р. С. Хасабала, А. В. Макаров, Ю. В. Якубовский, В. П. Мельников. — Изв. вузов. Геология и разведка, 1969, № 2, с. 125—128.
47. Вовченко Р. Г., Радченко Н. Ф. Применение геофизических методов на золоторудных месторождениях ключевского типа. — В кн.: Геология и разведка месторождений полезных ископаемых Забайкалья. Чита, 1968, с. 128—129.
48. Возможности методов электроразведки при поисках рудных тел и расшифровке закрытых структур в районе Джезказгана/Д. Альмуханбетов, Е. Алипеков, Н. Кульбаев, М. Омаров. — Изв. АН КазССР. Сер. геол., 1966, № 2, с. 43—51.
49. Волков И. Д., Сироткина Т. Н., Ремпель Г. Г. Применение геофизических методов при поисках и разведке рудных месторождений в Норильском районе. — Разведка и охрана недр, 1963, № 2, с. 30—34.
50. Волюхин А. М. О возможностях метода вызванной поляризации при поисках и разведке рудоносности интрузий в Норильском районе. — В кн.: Применение метода вызванной поляризации при поисках рудных месторождений. М., Недра, 1964, с. 73—80.
51. Волюхин А. М. Эффективность метода ВП при поисках скрытых месторождений сурьмы согласного типа на юге Киргизии. — Методика и техника разведки, 1970, № 72, с. 29—31. (ОНТИ ВИТР).
52. Вопросы теории метода вызванной поляризации/В. А. Комаров, Н. А. Пишпарева, М. С. Семенов, Л. С. Хлопонина. — Методика и техника разведки, 1961, № 30. 146 с. (ОНТИ ВИТР).
53. Вызванная поляризация горных пород и использование ее в электроразведке/В. А. Комаров, Л. М. Иоффе, Л. С. Хлопонина, М. В. Семенов. — В кн.: Новое в методике и технике геологоразведочных работ. Л., Гостоптехиздат, 1958, с. 236—257. (Труды ВИТР, № 1).
54. Газарян Г. О. Результаты применения метода вызванной поляризации на хромитовом месторождении. — Методика и техника разведки, 1965, № 49, с. 123—128. (ОНТИ ВИТР).
55. Гайдуков Н. Е., Семенов М. В. О перспективах усовершенствования методики геофизических поисков бокситов в Красноярском крае. — В кн.: Вопросы рудной геофизики Сибири. Новосибирск, 1967, с. 141—146. (Труды СНИИГГИМС, вып. 53).
56. Гарьковский В. Г., Хвалевский А. Г. Новые данные о геофизических поисках скрытых и погребенных рудных тел в Алма-Атинском районе. — Разведка и охрана недр, 1963, № 10, с. 43—48.
57. Гезич А. Е. Применение метода вызванной поляризации в рудных районах Северного Кавказа. — В кн.: Применение метода вызванной поляризации при поисках рудных месторождений. М., Недра, 1964, с. 42—59.
58. Гельбух А. А. Расчет установившегося поля вызванной поляризации тел, имеющих форму вытянутого и сжатого сфероидов. — Изв. АН СССР. Сер. геофиз., 1958, № 10, с. 1192—1201.
59. Геннадик Б. И. Поляризуемость сред, содержащих рассеянные электропроводящие включения. — Вopr. развед. геофизики, 1964, с. 45—82. (Труды горно-геол. ин-та БФАН СССР).
60. Геннадик Б. И. Влияние ореола рассеянной минерализации на величину аномалии вызванной поляризации. — Вopr. развед. геофизики, 1964, с. 83—95. (Труды горно-геол. ин-та БФАН СССР).
61. Геннадик Б. И. О связи вызванной поляризации ионопроводящих пород с диффузионными потенциалами. — Изв. вузов. Геология и разведка, 1967, № 8, с. 92—103.
62. Геннадик Б. И. О природе явления ВП в ионопроводящих породах. — Изв. вузов. Геология и разведка, 1967, № 12, с. 110—117.
63. Геннадик Б. И. Некоторые трактовки явления вызванной поляризации ионопроводящих пород. — Изв. вузов. Геология и разведка, 1968, № 2, с. 96—99.
64. Геннадик Б. И., Мельников В. П., Геннадик Г. Б. Теория вызванной электрохимической активности горных пород. Якутск, Якутское книжное изд-во, 1976. 159 с.
65. Геофизические исследования при поисках и разведке ртутных месторождений в СССР/М. Н. Стоппер, Н. Н. Боровко, В. В. Чупров и др. М., ОНТИ ВИЭМС, 1975. 64 с. (Сер. Регион., развед. и промысл. геофизика).
66. Геофизические методы при поисках и разведке ртутно-сурьмяных месторождений в Средней Азии и Казахстане/Ю. Ф. Анашин, В. Н. Базаров, А. М. Волюхин и др. М., ОНТИ ВИЭМС, 1974. 68 с. (Сер. Регион., развед. и промысл. геофизика).
67. Геофизические методы при прогнозировании и поисках рудных полей полиметаллических месторождений Салаирского кряжа/Н. А. Гладков, Ю. И. Ивасько, И. А. Розенфарб, В. Г. Шупиков. — Вopr. рудн. геофизики Сибири. Новосибирск, 1969, с. 95—103. (Труды СНИИГГИМС, вып. 92).
68. Геофизические поиски рудных месторождений/В. А. Кличников, В. В. Бродовой, М. Д. Морозов и др. Алма-Ата, 1970. 810 с.
69. Гитлин Я. Л. Результаты применения методов скважинной геофизики на этапе разведки полиметаллических месторождений Рудного Алтая. — В кн.: Геофизические исследования в Казахстане. Алма-Ата, Казахстан, 1965, с. 215—226.
70. Гладков Н. А. О применении методов вызванной поляризации и естественного поля при изучении геосинклинальных бокситов. — В кн.: Геологическая эффективность геофизических исследований в Забайкалье, вып. 1. Чита, 1972, с. 44—46.
71. Глестон С. Введение в электрохимию. М., ИЛ, 1950. 768 с.
72. Голод М. И. Метод вызванной поляризации при поисках пегматитовых жил в межскважинном пространстве. — В кн.: Геология слюдяных районов и слюдяных месторождений Карело-Кольского региона и их разведка. Петрозаводск, Карелия, 1975, с. 110—115.
73. Голод М. И. Электроразведка при поисках пегматитовых зон на Кольском полуострове. — В кн.: Геофизические исследования северо-восточной части Балтийского щита. Апатиты, 1976, с. 73—78.
74. Голод М. И., Меламед Г. Ш. Методика геофизических работ при крупномасштабном геологическом картировании и поисках слюдяных месторождений в Северной Карелии. — В кн.: Методика, техника и результаты геофизической разведки. М., Недра, 1967, с. 449—455.
75. Голод М. И., Дмитриев Г. И., Гришин А. С. Об использовании метода вызванной поляризации на месторождениях слюды. — Геофизические исследования докембрийских образований Карелии. Петрозаводск, 1968, с. 26—31. (Труды Ин-та геологии КФАН СССР).

76. Голубков В. В., Романенко В. П. Опыт работ методом вызванной поляризации по проблеме прямых поисков нефти и газа в Прикаспийской впадине. М., ОНТИ ВИЭМС, 1971, с. 88—91. (Регион. развед. и промысл. геофизика, № 22).
77. Гольдшмидт В. И. Геологическая эффективность высокоточной гравиметровой съемки. — Вопр. рудн. геофизики в Казахстане, 1968, № 2, с. 83—91. (Труды Казфилиала ВИРГ).
78. Горин А. З. Применение метода вызванной поляризации на магнетитовом месторождении в Горной Шории. — В кн.: Применение метода вызванной поляризации при поисках рудных месторождений. М., Недра, 1964, с. 126—128.
79. Гречухин В. В. Классификация угольных месторождений по геофизическим признакам. — Сов. геология, 1964, № 7, 116—122.
80. Григорьева Н. П. Сравнение аномалий  $R_k$  над проводящей сферой для различных установок метода постоянного тока. — В кн.: Геофизическая разведка рудных месторождений. Л., Гостгеолгиздат, 1953, с. 83—122. (Труды ВИРГ).
81. Дамаскин Б. Б. Принципы современных методов изучения электрохимических реакций. М., Изд-во Моск. ун-та, 1965. 82 с.
82. Дахнов В. Н. Электрическая разведка нефтяных и газовых месторождений. 2-е изд. М., Гостоптехиздат, 1953. 498 с.
83. Дахнов В. Н. Интерпретация результатов геофизических исследований разрезов скважин. 2-е изд. М., Недра, 1972. 368 с.
84. Дахнов В. Н. Промысловая геофизика. М., Гостоптехиздат, 1959. 496 с.
85. Дахнов В. Н., Латышова М. Г., Ряполова В. А. Исследование скважин методом искусственно вызванных потенциалов (электролитический каротаж). — В кн.: Промысловая геофизика. М., Гостоптехиздат, 1952, с. 46—82.
86. Дахнов В. Н., Добрынин В. М. Определение удельной поверхности и проницаемости песчаных коллекторов по данным метода потенциалов вызванной поляризации. — Прикл. геофизика, 1960, вып. 25, с. 177—191.
87. Демьяновская Е. И. Об использовании вызванных потенциалов при изучении марочного состава углей Львовско-Волынского бассейна. — Геофиз. сб., 1962, вып. 1, с. 112—115. (Труды Ин-та геофизики АН УССР).
88. Добрынин В. М. Элементы теории поля потенциалов вызванной поляризации в скважинах. — В кн.: Вопросы геологии и добычи нефти. М., Гостоптехиздат, 1958, с. 126—141. (Тр. Моск. нефт. ин-та, вып. 22).
89. Добрынин В. М. Состояние и перспективы применения метода потенциалов вызванной поляризации для изучения нефтяных и газовых скважин. — В кн.: Состояние и перспективы развития геофизических методов. М., Гостоптехиздат, 1961, с. 544—548.
90. Дойков Ж. Краткий обзор геофизических методов поисков и разведки слепых рудных тел в НР Болгарии. — В кн.: Труды 7 конгресса Карпато-Балканской геологической ассоциации. София, 1965, с. 21—29.
91. Дубов В. А. О возможности изучения бокситов методом вызванной поляризации. — Разведка и охрана недр, 1972, № 1, с. 58—60.
92. Жаворонкова В. В. О кривых разложения для некоторых минеральных электродов. — Изв. вузов. Геология и разведка, 1967, № 4, с. 101—110.
93. Жаворонкова В. В. Некоторые результаты экспериментального исследования спада э. д. с. ВП сульфидных минералов. — В кн.: Вопросы разведочной геофизики. Свердловск, 1968, с. 201—207. (Труды Свердл. горн. ин-та, вып. 54).
94. Жаворонкова В. В., Кормильцев В. В. К вопросу о происхождении вызванной поляризации пирита. — В кн.: Электрометрия при поисках сульфидных месторождений. Свердловск, 1968, с. 19—22. (Труды Ин-та геофизики Уф АН СССР).
95. Жаворонкова В. В., Кормильцев В. В., Улитин Р. В. Экспериментальное изучение электродного импеданса пирита. — Изв. вузов. Геология и разведка, 1967, № 3, с. 119—122.
96. Жакупов Б. Е. Способы учета влияния сопротивления на поляризуемость. — Вопр. рудн. геофизики в Казахстане, 1968, № 2, с. 152—157. (Труды Казфилиала ВИРГ).
97. Жигалин А. Д. Исследования оползневых склонов геофизическими методами. — Разведка и охрана недр, 1977, № 1, с. 39—44.
98. Заборовский А. И. Специальные функции для геофизиков-разведчиков. М., ОНТИ, 1939. 138 с.
99. Заборовский А. И. Электроразведка. М., Гостоптехиздат, 1963. 424 с.
100. Земцов В. Н. Методика геофизических работ на вольфрам в Приморье. — Геология и геофизика, 1976, № 5, с. 78—89.
101. Запорожский Э. Ф., Гладков Н. А. О связи бокситооруднения с зонами разломов и сульфидизации. — В кн.: Геофизические методы поисков и разведки месторождений полезных ископаемых Сибири. Новосибирск, 1971, с. 116—118. (Труды СНИИГТИМС, вып. 136).
102. Иванкин П. Ф., Семенов М. В. О новых задачах рудной геофизики на примере поисков и оценки полиметаллических месторождений. — В кн.: Вопросы рудной геофизики Сибири. Новосибирск, 1967, с. 32—44. (Труды СНИИГТИМС, вып. 53).
103. Иголкин В. И. Результаты наблюдений характера поляризуемости моделей и образцов горных пород и руд. — В кн.: Вопросы рудной геофизики Сибири. Новосибирск, 1967, с. 165—169. (Труды СНИИГТИМС, вып. 53).
104. Ильин Ю. Т. Опыт применения методов вызванной поляризации и естественного поля на марганцевых месторождениях Центрального Казахстана. — Вестн. Ленингр. ун-та. Геология и география, 1967, № 18, с. 71—75.
105. Ильин Ю. Т. Электрохимические свойства некоторых марганцевых минералов и руд. — Вестн. Ленингр. ун-та. Геология и география, 1968, № 4, с. 82—87.
106. Ильин Ю. Т., Штерн Н. Л., Фельдштейн Е. К. Поляризуемость марганцевых минералов и руд. — Вестн. Ленингр. ун-та. Геология и география, 1973, № 4, с. 53—61.
107. Инструкция по электроразведке. Ч. II. М., Недра, 1966. 232 с.
108. Исследование переходных процессов при вызванной поляризации пирита, графита, пиритизированных и графитизированных пород/В. В. Кормильцев, М. В. Поздняков, А. И. Человечков, И. М. Федоров. — В кн.: Аппаратура и метод вызванной поляризации с измерением скорости спада. Свердловск, Изд-во УНЦ АН СССР, 1976, с. 3—40.
109. Иоффе Л. М. Аппаратура для работ по методу вызванной поляризации. — Методика и техника разведки, 1957, № 8, с. 50—53. (ОНТИ ВИТР).
110. Иоффе Л. М. Облегченная аппаратура для работ методом вызванной поляризации и ее применение. — В кн.: Применение метода вызванной поляризации при поисках рудных месторождений. М., Недра, 1964, с. 102—107.
111. Иоффе Л. М. Об импульсных способах измерений в методе вызванной поляризации. — Методика и техника разведки, 1965, № 49, с. 63—78. (ОНТИ ВИТР).
112. Канеев А. Т., Пузанов В. М. Опыт измерений полей вызванной поляризации способом разнополярных импульсов. — В кн.: Применение метода вызванной поляризации при поисках рудных месторождений. М., Недра, 1964, с. 111—119.
113. Канеев А. Т., Пузанов В. М. Результаты изучения полей ВП разнополярными импульсами в Южном Казахстане. — В кн.: Методика, техника и результаты геофизической разведки. М., Недра, 1967, с. 508—510.
114. Канеев А. Т., Слащинин В. В. Геофизические исследования при детальном геологическом картировании и поисках в Южном Казахстане. — В кн.: Геофизические исследования при геологическом картировании. Алма-Ата, 1968, с. 82—88.
115. Карасев А. П., Бумагин О. В. Экспериментальное изучение переходных характеристик ранней стадии вызванной поляризации. Методы разведочной геофизики. — В кн.: Вопросы электроразведки рудных месторождений. Л., 1977, с. 11—21. (Труды НПО «Геофизика»).
116. Карасев А. П., Кривоносенко Н. И., Сейфуллин Р. С. Опыт применения аппаратуры для изучения ранней стадии вызванной поляризации. — Геофиз. аппаратура, 1968, вып. 36, с. 81—87.

117. К вопросу о возможности предварительной оценки рудоносности интрузий габбро-диабазов в Норильском районе с помощью метода вызванной поляризации/И. Д. Волков, А. М. Волюхин, А. М. Орлов, Б. В. Хмылев. — Методика и техника разведки, 1960, № 23, с. 60—66. (ОНТИ ВИТР).
118. Кинетика электродных процессов/А. Н. Фрумкин, В. С. Богоцкий, З. А. Иоффа, Б. Н. Кабанов. М., Изд-во Моск. ун-та, 1952. 260 с.
119. Кличников В. А., Эттингер В. Р. Геофизические исследования в юго-восточной части Центрального Казахстана. — В кн.: Геофизические исследования в Казахстане. Алма-Ата, Казахстан, 1965, с. 111—119.
120. К методике работ по методу ИНФАЗ-ВП с установкой градиента/В. И. Лемец, Ю. Н. Минин, Г. В. Орлов, В. Ф. Сарбаш. — Вопр. рудн. геофизики в Казахстане, 1973, вып. 5, с. 42—48.
121. Кобранова В. Н. Физические свойства горных пород. М., Гостоптехиздат, 1962. 490 с.
122. Комаров В. А. К вопросу об использовании явления вызванной поляризации в геофизической разведке. — Сб. науч.-техн. информ., 1955, № 1, с. 73—75.
123. Комаров В. А. О природе электрических полей вызванной поляризации и возможностях их использования при поисках рудных месторождений. — Вестн. Ленингр. ун-та. Геология и география, 1957, № 6, с. 29—40.
124. Комаров В. А. Основы использования метода вызванной поляризации при поисках рудных месторождений. — Методика и техника разведки, 1960, № 23, с. 7—17. (ОНТИ ВИТР).
125. Комаров В. А. Метод вызванной поляризации применительно к рудным месторождениям. — В кн.: Состояние и перспективы развития разведочной геофизики. М., Гостоптехиздат, 1961, с. 369—373.
126. Комаров В. А. Элементы теории метода вызванной поляризации. — В кн.: Новое в методике и технике геологоразведочных работ. Л., Гостеолтехиздат, 1961, с. 138—171. (Труды ВИТР, № 3).
127. Комаров В. А. Метод вызванной поляризации и перспективы его применения для поисков вкрапленных руд. — Сов. геология, 1962, № 6, с. 130—134.
128. Комаров В. А. Методика изучения поляризуемости образцов горных пород. Обмен опытом, 1962, вып. 56. 35 с. (ОНТИ ВИТР).
129. Комаров В. А. Об одной особенности аномалий  $r_k$  для градиент-установки. — Учен. зап. Ленингр. ун-та, 1963, № 320, вып. 14, с. 96—99.
130. Комаров В. А. Метод вызванной поляризации — средство поисков рудных месторождений. — В кн.: Применение метода вызванной поляризации при поисках рудных месторождений. М., Недра, 1964, с. 5—26.
131. Комаров В. А. Временные характеристики вызванной поляризации. — Методика и техника разведки, 1965, № 49, с. 29—62. (ОНТИ ВИТР).
132. Комаров В. А. Вспомогательные таблицы для вычисления кажущегося удельного сопротивления. — Методика и техника разведки, 1965, № 49, с. 161—190. (ОНТИ ВИТР).
133. Комаров В. А. О связи вызванной поляризации, создаваемой постоянным и переменным током. — Методика и техника разведки, 1967, № 59, с. 105—115. (ОНТИ ВИТР).
134. Комаров В. А. Метод вызванной поляризации и его применение для поисков рудных месторождений. — Методика и техника разведки, 1967, № 58, с. 104—107. (ОНТИ ВИТР).
135. Комаров С. Г. О применении вызванных потенциалов для оценки коллекторских свойств пластов. — Прикл. геофизика, 1958, вып. 21, с. 197—210.
136. Комаров С. Г., Котов П. Т. Об определении проницаемости пластов по вызванным потенциалам. — Прикл. геофизика, 1964, вып. 40, с. 163—173.
137. Комаров В. А., Пишпарева Н. А. Экспериментальные данные о вызванной поляризации электронных проводников. — Методика и техника разведки, 1965, № 49, с. 7—27. (ОНТИ ВИТР).
138. Комаров В. А., Попов И. И. Принципы выделения локальных аномалий в обстановке сложных полей вызванной поляризации. — Методика и техника разведки, 1967, № 59, с. 30—38. (ОНТИ ВИТР).
139. Комаров В. А., Рысс Ю. С. Некоторые результаты применения метода вызванной поляризации на полиметаллических месторождениях Рудного Алтая. — Разведка и охрана недр, 1959, № 2, с. 31—36.
140. Комаров В. А., Рысс Ю. С. Метод вызванной поляризации. — В кн.: Справочник геофизика. Т. 3. М., Гостоптехиздат, 1963, с. 330—348.
141. Комаров В. А., Шаповалов О. М. Методика моделирования полей вызванной поляризации рудных тел. — Методика и техника разведки, 1965, № 49, с. 79—90. (ОНТИ ВИТР).
142. Комаров В. А., Шубникова К. Г. О связи временных параметров вызванной поляризации с размером поляризуемых тел. — Методы разведочной геофизики, вып. 26. Электроразведка. Л., 1976, с. 109—114. (Труды НПО «Геофизика»).
143. Комаров В. А., Иоффе Л. М., Семенов М. В. Метод вызванной поляризации (Методические указания). Обмен опытом, 1959, вып. 20. 84 с. (ОНТИ ВИТР).
144. Комаров В. А., Иоффе Л. М., Смирнов А. А. Принципы метода нелинейной вызванной поляризации. — Методика и техника разведки, 1972, № 81, с. 55—63. (ОНТИ ВИТР).
145. Комаров В. А., Пишпарева Н. А., Шафаренко В. А. О влиянии параметров верхнего слоя пород на кажущуюся поляризуемость, измеряемую в скважинах. — Методика и техника разведки, 1967, № 59, с. 50—76. (ОНТИ ВИТР).
146. Комаров В. А., Смирнов А. А., Иоффе Л. М. Метод нелинейной вызванной поляризации на переменном токе. — В кн.: Методы разведочной геофизики. Вопросы электроразведки рудных месторождений. Л., 1977, с. 26—33. (Труды НПО «Геофизика»).
147. Комаров В. А., Сергеев С. П., Шувал-Сергеев А. Н. Определение эффектов вызванной поляризации, порождаемых импульсами токов сложной формы. — В кн.: Методы разведочной геофизики. Вопросы электроразведки рудных месторождений. Л., 1977, с. 39—44. (Труды НПО «Геофизика»).
148. Комаров В. А., Фокин А. Ф., Франтов Г. С. О применении метода вызванной поляризации при археологических поисках кострищ с углем. — Сов. археология, 1967, № 1, с. 301—304.
149. Комплексная методика поисков скрытого оружия на Майкаинских месторождениях/Д. А. Видгорович, Г. С. Гончаров, М. А. Черкас, В. А. Шафаренко. — Методы и техника разведки, 1965, № 53, с. 17—21. (ОНТИ ВИТР).
150. Кондратенко А. Ф. Применение пульсирующих токов для комплексных электроразведочных исследований методами вызванной поляризации, становления поля и сопротивления. — Геофиз. разведка, 1962, вып. 9, с. 66—73.
151. Кондратенко А. Ф., Шайдунов Г. Я. Аппаратура для работ методом вызванной поляризации с использованием постоянного и переменного тока. — Геофиз. аппаратура, 1968, вып. 37, с. 51—56.
152. Кондратенко А. Ф., Шайдунов Г. Я. Комплексный электроразведочный прибор КЭП-М. — Геофиз. аппаратура, 1968, вып. 37, с. 37—43.
153. Кормильцев В. В. О возбуждении и спаде вызванной поляризации в капиллярной среде. — Изв. АН СССР. Сер. геофиз., 1963, № 11, с. 1658—1666.
154. Кормильцев В. В. К вопросу о вызванной поляризации в высокодисперсных средах. — В кн.: Электрометрия при поисках сульфидных месторождений. Свердловск, 1968, с. 11—17. (Труды Ин-та геофизики УФ АН СССР).
155. Кормильцев В. В. Длительное возбуждение вызванной поляризации на колчеданных месторождениях Оренбургской области. — В кн.: Электрометрия при поисках сульфидных месторождений. Свердловск, 1968, с. 71—78. (Труды Ин-та геофизики УФ АН СССР).
156. Кормильцев В. В., Сидоров В. А. Метод вызванной поляризации и его место в комплексе методов при поисках колчеданных руд в Оренбургской области. — В кн.: Применение метода вызванной поляризации при поисках рудных месторождений. М., Недра, 1964, с. 66—73.
157. Кормильцев В. В., Улитин Р. В. Связь вызванной поляризации на переменном токе с фарадеевским импедансом и емкостью двойного электриче-

ского слоя. — В кн.: Методические вопросы рудной геофизики Урала. Свердловск, 1965, с. 125—133. (Труды Ин-та геофизики УФ АН СССР).

158. *Кормильцев В. В., Улитин Р. В.* Переходные процессы при вызванной поляризации пирита. — Изв. АН СССР. Сер. Физика Земли, 1966, № 7, с. 71—78.

159. *Кормильцев В. В., Поздняков М. В., Сомов В. Ф.* О вызванной поляризации песчано-глинистых пород. — В кн.: Аппаратура и метод вызванной поляризации с измерением скорости спада. Свердловск, Изд-во УНЦ АН СССР, 1976, с. 41—68.

160. *Краев А. П.* Основы геоэлектрики. Л., Недра, 1965. 588 с.

161. *Кричари Г. А., Варфоломеева Е. К.* К методике изучения вызванной поляризации пористых минеральных систем, насыщенных электролитом слабой минерализации. — В кн.: Аппаратура, методика и интерпретация геофизических наблюдений. Казань, Изд-во Казан. ун-та, 1965, с. 141—143.

162. *Кричари Г. А., Варфоломеева Е. К.* Некоторые данные о явлениях вызванной поляризации. — Там же, с. 144—146.

163. *Круглова З. Д.* Геологическая природа аномалий вызванной поляризации на газонефтяных месторождениях. — Развед. геофизика, 1972, вып. 49, с. 58—65.

164. *Круглова З. Д., Богуславский А. К.* Применение метода вызванной поляризации в районе Газлинского газового месторождения. — Развед. геофизика, 1969, вып. 31, с. 68—76.

165. *Круглова З. Д., Ануфриев А. А., Яковлев А. П.* О природе аномалий вызванной поляризации на нефтяных месторождениях Прикаспийской впадины. — Развед. геофизика, 1976, вып. 71, с. 78—82.

166. *Кудымов Б. Я., Котов П. Т.* Сравнительные исследования вызванной поляризации осадочных горных пород. — Прикл. геофизика, 1957, вып. 16, с. 213—226.

167. *Кудымов Б. Я., Котов П. Т.* О природе вызванной поляризации осадочных пород. — Прикл. геофизика, 1958, вып. 20, с. 134—140.

168. *Кузьмина Э. Н.* Использование метода вызванной поляризации для поисков грунтовых вод. — В кн.: Применение метода вызванной поляризации при поисках рудных месторождений. М., Недра, 1964, с. 138—141.

169. *Кузьмина Э. Н.* Некоторые результаты изучения связи вызванной поляризации образцов карбонатных пород с их плотностными и водно-коллекторскими свойствами. — Вестн. Моск. ун-та. Сер. Геология, 1964, вып. 5, с. 89—95.

170. *Кузьмина Э. Н., Огильви А. А.* О возможности использования метода вызванных потенциалов для изучения подземных вод. — Развед. геофизика, 1965, вып. 9, с. 47—59.

171. *Куташов И. Н., Марус А. И.* Эффективность методов электроразведки при поисках и разведке месторождений антрацитов в Горловском бассейне. — Разведка и охрана недр, 1966, № 11, с. 36—40.

172. *Кушербаев Н. И., Бисенгалиев И. М., Губанов Л. А.* Геофизические поиски андалузито-корундовых залежей во вторичных кварцитах. — Вопр. руд. геофизики в Казахстане, 1968, № 2, с. 15—21. (Труды Казфиллиала ВИРГ).

173. *Ланда В. Е.* Комплексное применение методов скважинной геофизики на сульфидных месторождениях Восточного Забайкалья. — Вопр. руд. геофизики Сибири. Новосибирск, 1967, с. 78—86. (Труды СНИИГГИМС, вып. 53).

174. *Латышова М. Г.* О зависимости между вызванными потенциалами и проницаемостью песчанников. — Труды Моск. нефт. ин-та, 1953, вып. 12, с. 75—79.

175. *Латышова М. Г., Добрынин В. М.* Моделирование метода вызванных потенциалов. — Труды Моск. нефт. ин-та, 1955, вып. 15, с. 170—185.

176. *Латышова М. Г., Добрынин В. М.* Метод потенциалов вызванной поляризации и его значение для исследования нефтяных и газовых скважин. — В кн.: Разведка и разработка нефтяных и газовых месторождений. М., Гостехиздат, 1958, с. 124—128.

177. *Латышова М. Г., Шеффер Н. Д.* К вопросу о потенциалах вызванной поляризации тонкодисперсных песчано-глинистых пород. — Труды Моск. нефт. ин-та, 1955, вып. 15, с. 159—169.

178. *Липская А. Э., Ряполова В. А.* Метод вызванных потенциалов. — Труды Произв. и науч.-исслед. ин-та по инж. изысканиям в стр-ве Госстроя СССР, 1969, № 1, с. 60—84.

179. *Литвинов Э. М., Подгорных Л. В.* Неполаризующиеся электроды при измерении естественных электрических полей. — Информ. сообщение, 1966, № 6. (Сер. Регион., развед. и промысл. геофизика).

180. *Логачев А. А., Захаров В. П.* Магниторазведка. 4-е изд., перераб. и доп. Л., Недра, 1973. 352 с.

181. *Ляхов Л. Л., Мельников В. П.* О возможностях использования фазово-частотных характеристик ВП для классификации аномалий поляризуемости. — Изв. вузов. Сер. Геология и разведка, 1968, № 7, с. 153—154.

182. *Маркушин Я. В.* Эффективность метода вызванной поляризации на Южном Алтае. — Разведка и охрана недр, 1964, № 6, с. 32—35.

183. *Маркушин Я. В.* Сравнительная эффективность ВЭЗ-ВП с ортогональной и симметричной установками. — Разведка и охрана недр, 1966, № 4, с. 58—60.

184. *Маркушин Я. В.* Некоторые результаты применения скважинных геофизических методов при поисках медно-пирротиновых руд на Южном Алтае. — Методика и техника разведки, 1967, № 57, с. 33—44. (ОНТИ ВИТР).

185. *Маркушин Я. В.* К вопросу об эффективности метода вызванной поляризации на Южном Алтае. — Геофиз. исследования в Казахстане, 1968, № 2, с. 225—237.

186. *Маркушин Я. В., Борцов В. Д., Ткаченко Г. Г.* О поляризуемости горных пород, содержащих ферромагнитные минералы. — Разведка и охрана недр, 1967, № 6, с. 29—34.

187. *Маркушин Я. В., Борцов В. Д., Чуприн И. С.* Сравнительные особенности вызванной поляризации некоторых рудных и породообразующих минералов. — Изв. АН СССР. Сер. Физика Земли, 1973, № 2, с. 51—61.

188. *Маркушин Я. В., Нахтигаль Г. П., Ткаченко Г. Г.* О характере региональных полей вызванной поляризации в Восточном Казахстане. — Методика и техника разведки, 1967, № 59, с. 23—29. (ОНТИ ВИТР).

189. *Марморштейн Л. М., Андреев В. С.* Измерение вызванной поляризации горных пород для изучения их коллекторских свойств на установке УВП-НИИГА-1. — В кн.: Статьи по геологии и нефтегазоносности Арктики. Л., Гостоптехиздат, 1962, с. 132—138.

190. *Матюхин Н. Е., Харламов В. С.* Геофизические исследования при поисках никеля в Северном Прибайкалье. — Вопр. геологии Прибайкалья и Забайкалья, 1966, вып. 1, с. 193—194.

191. *Мелентьев М. И., Лемец В. И., Васильев А. М.* Применение геофизических методов при картировании кор выветривания в Центральном Казахстане. — В кн.: Геофизические исследования в Казахстане. Алма-Ата, 1971, с. 257—267. (Материалы III Республиканской геофизической конференции).

192. *Мельников В. П.* Опыт измерения вызванной поляризации в гармонических полях. — Развед. геофизика, 1967, вып. 24, с. 55—59.

193. *Методика и результаты геофизических работ при поисках медноколчеданных месторождений в Мугоджарах/А. П. Бачин, Г. Р. Бекжанов, В. В. Бродовой и др.* — В кн.: Состояние и задачи разведочной геофизики. М., Недра, 1970, с. 298—301. (Материалы VI Всесоюзной научно-технической геофизической конференции).

194. *Миков Д. С.* Атлас теоретических кривых для интерпретации магнитных и гравитационных аномалий. М., Гостехиздат, 1956. 96 с.

195. *Милецкий Б. Е.* Северные Мугоджары — новая меднорудная провинция СССР. — Разведка и охрана недр, 1970, № 1, с. 5—9.

196. *Михайлов Г. Н.* Опыт работ методом вызванной поляризации на одном из медно-никелевых месторождений Кольского полуострова. — В кн.: Вопросы разведочной геофизики. Л., Недра, 1964, с. 20—27. (Труды ВИРГ).

197. *Михайлов Г. Н., Неганов И. И., Смирнов А. А.* Некоторые результаты

изучения переходных характеристик вызванной поляризации на рудных месторождениях. — В кн.: Методы разведочной геофизики. Вопросы электроразведки рудных месторождений. Л., 1977, с. 22—26. (Труды НПО «Геофизика»).

198. Михайлов Г. Н., Юргенс И. Р., Яговкин Б. В. Руководство по методу вызванной поляризации. Л., Недра, 1973. 166 с.

199. Михальсон И. С. Методика определения новых параметров вызванной поляризации. — Вопр. рудн. геофизики в Казахстане, 1968, вып. 2, с. 170—175. (Труды Казфилла ВИРГ).

200. Михальсон И. С. Теоретическое обоснование повышения геологической эффективности метода вызванной поляризации. — Вопр. рудной геофизики в Казахстане, 1968, вып. 2, с. 176—182. (Труды Казфилла ВИРГ).

201. Могильников В. И. Методика и результаты работ методом вызванной поляризации в пределах северных склонов Кураминского хребта. — В кн.: Применение метода вызванной поляризации при поисках рудных месторождений. М., Недра, 1964, с. 107—114.

202. Мустафабеи М. А., Хесин Б. Э., Мурадханов С. А., Алексеев В. В. Поиски медно-полиметаллических месторождений на южном склоне Большого Кавказа с применением геофизических методов. — Разведка и охрана недр, 1964, № 9, с. 30—37.

203. Некоторые результаты амплитудно-фазовых измерений нелинейной вызванной поляризации в полевых условиях/В. А. Попов, В. В. Сушкевич, Л. З. Бобровников, Н. В. Сушкевич. ВИНТИ, № 1359—76 деп. от 20 апреля 1976 г. 56 с.

204. Некоторые результаты опробования метода вызванной поляризации на рудных месторождениях/В. А. Комаров, Н. А. Пишпарева, М. В. Семенов, Л. С. Хлопнина. — Методика и техника разведки, 1957, № 8, с. 42—49. (ОНТИ ВИРГ).

205. Нечаева Г. П. Некоторые результаты измерения поляризуемости образцов горных пород. — Геофиз. исследования, 1964, № 1, с. 52—58.

206. Нечаева Г. П. Зависимость вызванной поляризации от времени пропуска тока как характеристика среды. — Вестн. Моск. ун-та. Сер. Геология, 1965, № 3, с. 83—86.

207. Нечаева Г. П. Результаты изучения временных характеристик вызванной поляризации. — Вестн. Моск. ун-та. Сер. Геология, 1966, № 5, с. 106—110.

208. Нурпейсов М. Д., Костюшин В. А. Некоторые результаты крупномасштабных комплексных геолого-геофизических работ в Саяском рудном районе. — В кн.: Геофизические исследования при геологическом картировании. Алма-Ата, 1968, с. 89—91.

209. О влиянии гидротермальных изменений на физические свойства пород (на примере молибденовых рудопоявлений)/Б. М. Искитов, В. И. Лемец, С. В. Васильев, Б. И. Кислый. — Вопр. рудн. геофизики в Казахстане, 1973, № 3, с. 233—242. (Труды Казфилла ВИРГ).

210. Опыт применения методов электроразведки при поисковых работах в Западной Калбе/А. Ш. Богданов, В. Д. Борцов, Г. И. Журавлев, И. М. Жигорловский. — Разведка и охрана недр, 1967, № 8, с. 36—40.

211. Опыт применения новой электроразведочной станции ВП-59 для работ по методу вызванной поляризации/А. М. Алексеев, Л. М. Иоффе, М. В. Семенов и др. — Разведка и охрана недр, 1960, № 11, с. 47—49.

212. О связи физических свойств горных пород с процессами окорудного изменения/А. А. Смелов, С. С. Ромашин, Т. Джунусов, Р. С. Сейфуллин. — Вопр. рудн. геофизики в Казахстане, 1968, № 2, с. 194—199. (Труды Казфилла ВИРГ).

213. Основные принципы комплексирования геофизических и геохимических методов при поисках и разведке глубоко залегающих рудных месторождений в Советском Союзе/В. А. Кличников, М. Д. Морозов, Л. П. Жоголев и др. — В кн.: Геофизические исследования при геологическом картировании. Алма-Ата, 1968, с. 317—328.

214. Основные итоги геофизических работ при поисках и разведке рудных полезных ископаемых в Западной и Средней Сибири/Б. Д. Миков, Г. Н. Константинов, М. В. Семенов и др. — В кн.: Вопр. рудн. геофизики Сибири. Новосибирск, 1967, с. 5—31. (Труды СНИИГГИМС, вып. 53).

215. Пишпарева Н. А., Артамонов Е. В. Применение метода вызванной поляризации при поисках никелевых месторождений на юге Русской платформы. — Методика и техника разведки, 1965, № 49, с. 151—159. (ОНТИ ВИРГ).

216. Пишпарева Н. А., Григорьева Н. П., Сторожевых Н. С. Опыт применения метода вызванной поляризации на Кольском полуострове. — Методика и техника разведки, 1960, № 23, с. 50—59 (ОНТИ ВИРГ).

217. Плюснин М. И., Постельников А. Ф. Картаж разведочных скважин на полиметаллических месторождениях Южного Казахстана. — Изв. вузов. Сер. Геология и разведка, 1958, № 3, с. 94—110.

218. Поиски грунтовых вод методом потенциалов вызванной поляризации/В. Вахье, Ч. Холмс, П. Кинтзингер, М. Лавернье. — Промысл. геофизика, 1959, вып. 1, с. 195—211.

219. Поиски глубокозалегающего сульфидного оруденения геофизическими методами/Г. С. Гончаров, А. С. Тясто, Б. Б. Шатров, Л. С. Хлопнина. — Разведка и охрана недр, 1964, № 4, с. 51—53.

220. Поиски и разведка полиметаллов в северо-западной части Рудного Алтая/В. С. Моисеев, А. М. Панасевич, Ю. В. Синдяев, А. А. Мошков. — Вопр. рудн. геофизики Сибири. Новосибирск, 1967, с. 57—68. (Труды СНИИГГИМС, вып. 53).

221. Поляков А. С. К вопросу о вызванных электрических потенциалах в горных породах. — В кн.: Геофизические методы поисков полезных ископаемых. Л., Госгеолгиздат, 1951, с. 31—39.

222. Поляков А. С. Метод вызванной поляризации. — В кн.: Методы рудной геофизики. Л., ОНТИ ВИРГ, 1968, с. 37—45.

223. Поляков А. С., Воскобойник Н. И. Регистратор вызванных потенциалов с фотоусилителем РВПФ. — Вопр. развед. геофизики, 1962, № 2, с. 118—127. (Труды ВИРГ).

224. Попов И. И. О применении метода вызванной поляризации при оценке перспективности Тамдынского горного массива. — Методика и техника разведки, 1965, № 49, с. 143—149. (ОНТИ ВИРГ).

225. Попов И. И. Некоторые результаты полевых работ методом вызванной поляризации с использованием скважин. — Методика и техника разведки, 1967, № 59, с. 89—94. (ОНТИ ВИРГ).

226. Попов И. И., Мирошников Ю. Г. Применение метода вызванной поляризации на полиметаллическом месторождении в Узбекистане. — В кн.: Применение метода вызванной поляризации при поисках рудных месторождений. М., Недра, 1964, с. 89—93.

227. Постельников А. Ф. К вопросу о природе вызванной поляризации в осадочных горных породах. — Изв. вузов. Сер. Геология и разведка, 1959, № 2, с. 126—136.

228. Постельников А. Ф. Картаж скважин на месторождениях вкрапленных медно-никелевых руд Мончегорского промышленного района. — Труды МГРИ, 1959, т. 36, с. 23—31.

229. Постельников А. Ф. Выбор зонда в методе вызванной поляризации в скважинах. — Труды ЦНИГРИ, 1962, вып. 54, с. 128—131.

230. Постельников А. Ф. О природе и механизме образования вызванной поляризации на образцах электропроводящих горных пород. — Труды ЦНИГРИ, 1964, вып. 59, с. 153—164.

231. Постельников А. Ф., Зив Л. А. Поляризуемость образцов с рассеянной вкрапленностью частиц с электронной проводимостью. — Труды ЦНИГРИ, 1964, вып. 59, с. 168—175.

232. Постельников А. Ф., Зив Л. А., Шумятский Ю. К. Опыт применения каротажа по методу ВП для локализации зон сульфидного оруденения в различных геологических условиях. — Труды ЦНИГРИ, 1964, вып. 58, с. 117—124.

233. Применение временных характеристик ранней стадии вызванной поляризации при поисках сульфидных месторождений/А. П. Карасев, Р. С. Сейфуллин, О. В. Бумагин, В. И. Красников. М., Недра, 1973. 129 с.

234. Применение скважинных геофизических и геохимических методов при поисках и разведке сульфидно-касситеритовых месторождений Дальнего Во-

стока/М. В. Семенов, Т. Г. Рыбакова, С. С. Мещеряков и др. — Методика и техника разведки, 1970, № 72, с. 11—17. (ОНТИ ВИТР).

235. Пузанов В. М., Канев А. Т. Изучение и практическое использование временных характеристик вызванных потенциалов. — Вопр. рудн. геофизики в Казахстане, 1968, № 2, с. 135—143. (Труды Казфилнала ВИРГ).

236. Ревякин П. С., Аношин Ю. К., Борцов В. Д. Применение геофизических методов при поисках полиметаллических месторождений на Рудном Алтае. — Разведка и охрана недр, 1966, № 3, с. 31—38.

237. Рокитянский И. И. Лабораторное изучение вызванной поляризации осадочных пород. — Изв. АН СССР. Сер. геофиз., 1957, № 2, с. 217—227.

238. Рокитянский И. И. О природе вызванной поляризации непроводящих пород. — Изв. АН СССР. Сер. геофиз., 1959, № 7, с. 1055—1060.

239. Рысс Ю. С. Экспериментальные исследования вызванной поляризации электронных и ионных проводников. — В кн.: Вопросы рудной геофизики. Л., Госгеолтехиздат, 1957, с. 120—127. (Труды ВИРГ).

240. Рыжов А. А., Попов В. А. О связи временных и частотных характеристик поляризуемых сред. — Изв. вузов. Сер. Геология и разведка, 1975, № 10, с. 110—115.

241. Рыжов А. А., Черняк Г. Я., Шаранов Н. Н. Аппроксимация временных характеристик спада вызванной поляризации. — Изв. вузов. Сер. Геология и разведка, 1976, № 1, с. 120—123.

242. Рысс Ю. С. Об особенностях вызванной поляризации горных пород на безрудных участках. — В кн.: Новое в методике и технике геологоразведочных работ. Л., Гостоптехиздат, 1959, с. 76—85. (Труды ВИТР, № 2).

243. Рысс Ю. С. Поиски и разведка рудных тел контактным способом поляризационных кривых. Л., Недра, 1973. 167 с.

244. Ряполова В. А. Опыт применения метода вызванной поляризации при инженерно-геологических исследованиях. — Труды Всесоюз. науч.-исслед. ин-та гидрогеологии и инженер. геологии, 1967, вып. 5, с. 104—111.

245. Саковцев Г. П. О применимости метода вызванных потенциалов при поисках колчеданных месторождений. — В кн.: Сборник статей по геофизическим методам разведки. Свердловск, Госгеолтехиздат, 1955, с. 26—37. (Труды Свердл. горн. ин-та).

246. Самарин Б. П. Результаты опытных работ по методу вызванной поляризации на месторождениях Приморья. — В кн.: Применение метода вызванной поляризации при поисках рудных месторождений. М., Недра, 1964, с. 80—82.

247. Сафронов Н. И. Итоги работ ВИТР в области создания комплексных методов поисков глубокозалегающих месторождений рудных полезных ископаемых. — Методика и техника разведки, 1967, № 58, с. 85—89. (ОНТИ ВИТР).

248. Сафронов Н. И. Основы геохимических методов поисков рудных месторождений. Л., Недра, 1971. 216 с.

249. Свищников Г. Б. Электрохимические процессы на сульфидных месторождениях. Л., Изд-во Ленингр. ун-та, 1967. 160 с.

250. Сейфуллин Р. С., Гребенников Ю. С. Опыт применения геофизических методов при картировании рудоконтролирующих структур в Восточном Забайкалье. — Информ. сообщение № 2. Сер. Регион., развед. и промысл. геофизика, 1966. 42 с. (ОНТИ ВИАМС).

251. Сейфуллин Р. С., Гребенников Ю. С., Красников В. И. Поиски золото-сульфидных месторождений в Восточном Забайкалье с применением геофизических методов. — Информ. сообщение № 28. Сер. Регион., развед. и промысл. геофизика, 1968. (ОНТИ ВИАМС).

252. Сейфуллин Р. С., Снежневская Н. А., Топоркова С. П. Опыт картирования золото-сульфидных рудных полей. — Разведка и охрана недр, 1977, № 1, с. 38—42.

253. Селиверстов В. П., Стремилев О. И. Результаты полевых измерений вызванных потенциалов дифференциальной установкой. — Вопр. геологии Прибайкалья и Забайкалья, 1967, вып. 2, с. 309—311.

254. Семенов А. С. О методе РР. — Разведка недр, 1938, № 10, с. 47—48.

255. Семенов А. С. Электроразведка методом естественного электрического поля. 2-е изд. перераб. и доп. Л., Недра, 1974. 391 с.

256. Семенов А. С., Владимиров О. К. Каротаж рудных скважин методом скользящих контактов. М., Госгеолиздат, 1947. 64 с.

257. Семенов А. С., Ферцев М. Д., Мальцевский В. С. К вопросу о применимости параметра РР в геофизической разведке. — В кн.: Материалы ЦНИГРИ. Геофизика, сб. 8. М., Госгеолиздат, 1940, с. 76—84.

258. Семенов М. В. Об использовании скважин при работах методом вызванной поляризации. — Методика и техника разведки, 1960, № 23, с. 77—86. (ОНТИ ВИТР).

259. Семенов М. В. Скважинный вариант метода вызванной поляризации. — Обмен опытом, 1961, вып. 48. 45 с. (ОНТИ ВИТР).

260. Семенов М. В. Поиски глубоко залегающих рудных тел путем изучения полей вызванной поляризации в околоскважинном пространстве. — В кн.: Применение метода вызванной поляризации при поисках рудных месторождений. М., Недра, 1964, с. 83—89.

261. Семенов М. В. Метод вызванной поляризации при поисках рудных полей Алтая, закрытых наносами. — Геология и геофизика, 1966, № 5, с. 121—129.

262. Семенов М. В. Поле вызванной поляризации над вертикальным пластом, перекрытым наносами. — Методика и техника разведки, 1967, № 59, с. 7—22. (ОНТИ ВИТР).

263. Семенов М. В. Результаты моделирования полей ВП для выбора методики определения направления и угла падения зон сульфидной минерализации. — Методика и техника разведки, 1971, № 73, с. 49—53. (ОНТИ ВИТР).

264. Семенов М. В., Синдяев Ю. В. Применение метода вызванной поляризации при поисках и оценке зон сульфидной минерализации, закрытых наносами. — В кн.: Вопросы рудной геофизики Сибири. Новосибирск, 1967, с. 45—56. (Труды СНИИГГИМС, вып. 53).

265. Семенов М. В., Фокин А. Ф., Авдеевич М. М. Моделирование полей вызванной поляризации на установке для решения задач скважинной геофизики. — Методика и техника разведки, 1971, № 73, с. 46—48. (ОНТИ ВИТР).

266. Сергачук А. Х. Викиликана поляризация викопного вугілля. Киев, Изд-во АН УССР, 1963. 68 с.

267. Сергачук А. Ф., Сизоненко В. С. О применении метода вызванной поляризации при поисках зон полиметаллического оруденения в Приднестровье. — Геофизика и астрономия, 1967, № 11, с. 127—132.

268. Скважинная электроразведка методом вызванной поляризации/В. А. Комаров, Л. С. Хлопонина, А. Н. Балашев и др. Л., Недра, 1969. 158 с.

269. Смелов А. А., Сейфуллин Р. С. Некоторые результаты лабораторного изучения параметров спада вызванной поляризации. — Вопр. рудн. геофизики в Казахстане, 1968, № 2, с. 222—228. (Труды Казфилнала ВИРГ).

270. Смирнов А. А. Лабораторные исследования поля нелинейной вызванной поляризации электропроводящих минералов. — Методика и техника разведки, 1972, № 81, с. 75—82. (ОНТИ ВИТР).

271. Смирнов А. А. Экспериментальные исследования фарадеевского выпрямления тока электропроводящими минералами. — Методика и техника разведки, 1972, № 81, с. 83—91. (ОНТИ ВИТР).

272. Смирнов А. А., Комарова Е. Н. О временных характеристиках нелинейной вызванной поляризации. — В кн.: Методы разведочной геофизики. Вопросы электроразведки рудных месторождений. Л., 1977, с. 33—39. (Труды НПО «Геофизика»).

273. Смирнов В. И. Геологические основы поисков и разведок рудных месторождений. 2-е изд. М., Изд-во Моск. ун-та, 1957. 588 с.

274. Смирнов В. И. Курс высшей математики. Т. III, ч. 2. 5-е изд. М., Гостехиздат, 1953. 676 с.

275. Солодов А. А. Геологическая эффективность геофизических методов при крупномасштабном картировании структур рудных полей коренных месторождений золота. — В кн.: Геофизические исследования при геологическом картировании. Алма-Ата, 1968, с. 182—195.

276. Сравнение возможностей метода вызванной поляризации при импульсном и гармоническом возбуждении поля/В. И. Лемец, Г. В. Орлов, В. Ф. Сарбаш,

В. Д. Жильников. — *Вопр. рудн. геофизики в Казахстане*, 1973, с. 33—41. (Труды Казфилиала ВИРГ).

277. *Страттон Дж.* Теория электромагнетизма. М.—Л., Гостехиздат, 1948. 530 с.

278. *Тамм И. Е.* Основы теории электричества. М.—Л., Гостехтеориздат, 1954. 620 с.

279. *Таскаев В. Я.* Применение метода вызванной поляризации на северо-уральском медноколчеданном месторождении. — В кн.: *Применение метода вызванной поляризации при поисках рудных месторождений*. М., Недра, 1964, с. 135—138.

280. *Теоретические основы интерпретации наблюдений в методе вызванной поляризации*/В. А. Комаров, Н. А. Пишпарева, М. В. Семенов, Л. С. Хлопонина. Л., Недра, 1966. 204 с.

281. *Терехова Р. В., Кириллов В. М.* Результаты геофизических исследований по определению природы слабых магнитных аномалий. — В кн.: *Вопросы рудной геофизики Сибири*. Новосибирск, 1967, с. 93—105. (Труды СНИИГГИМС, вып. 53).

282. *Тихонов А. Н., Самарский А. А.* Уравнения математической физики. М., Гостехтеориздат, 1977. 735 с.

283. *Улитин Р. В.* О поляризуемости пород с вкрапленностью электропроводящих минералов на переменном токе. — В кн.: *Применение метода вызванной поляризации при поисках рудных месторождений*. М., Недра, 1964, с. 141—145.

284. *Улитин Р. В., Астраханцев Г. В.* О частотной дисперсии электрического сопротивления и поляризуемости горных пород. — В кн.: *Электрометрия при поисках сульфидных месторождений*. Свердловск, 1968, с. 49—54. (Труды Ин-та геофизики УФ АН СССР).

285. *Умышев Р. Д.* К вопросу об изучении временных характеристик спада вызванной поляризации. — *Вопр. рудн. геофизики в Казахстане*, 1968, № 2, с. 144—151. (Труды Казфилиала ВИРГ).

286. *Фазовые измерения в методе ВП на переменном токе. Методическое пособие*/А. В. Куликов, В. Д. Жильников, В. Ф. Сарбаш и др. Алма-Ата, Изд-во Казфилиала ВИРГ, 1975. 126 с.

287. *Фазовые измерения вызванной поляризации в сложных геологических условиях БССР*/В. А. Попов, Л. З. Бобровников, А. П. Ерышев, Ю. В. Аладинский. — *Изв. вузов. Сер. Геология и разведка*, 1970, № 3, с. 128—133.

288. *Фейгин Е. Б.* Эффективность геофизических методов при поисках и разведке рудных месторождений в западной и юго-западной частях Сибирской платформы. — В кн.: *Методика, техника и результаты геофизической разведки*. М., Недра, 1967, с. 440—445.

289. *Фридрихсберг Д. А., Сидорова М. П.* Исследования связи явления вызванной поляризации с электрокинетическими свойствами капиллярных систем. — *Вестн. Ленингр. ун-та. Сер. Физики и химии*, 1961, № 4, с. 57—69.

290. *Хасабала Р. С., Макаров А. В., Мельников В. П.* Влияние pH среды на вызванную поляризацию сульфидных минералов. — *Изв. вузов. Сер. Геология и разведка*, 1967, № 3, с. 123—126.

291. *Хасабала Р. С., Макаров А. В., Якубовский Ю. В., Мельников В. П.* Влияние плотности тока и концентрации электролита на вызванную поляризацию сульфидных минералов. — *Изв. вузов. Сер. Геология и разведка*, 1969, № 2, с. 125—128.

292. *Хесин Б. Э., Новикова О. В.* Об особенностях геофизических исследований при поисках пологопадающих магнетитовых залежей. — *Разведка и охрана недр*, 1966, № 12, с. 50—52.

293. *Хесин Б. Э., Мурадханов С. А.* Комплексные геофизические исследования при выявлении колчеданных руд на южном склоне Большого Кавказа. — В кн.: *Методика, техника и результаты геофизической разведки*. М., Недра, 1967, с. 423—426.

294. *Хлопонина Л. С.* Палетки для приближенных расчетов аномалий, вызванных эллипсоидальными телами. — *Методика и техника разведки*, 1965, № 49, с. 103—122. (ОНТИ ВИТР).

295. *Хлопонина Л. С.* Результаты расчетов аномального поля сферы при измерениях в скважине с азимутальной установкой. — *Методика и техника разведки*, 1966, № 55, с. 19—25. (ОНТИ ВИТР).

296. *Хлопонина Л. С.* Анализ аномалий вызванной поляризации, создаваемых сфероидальными телами в условиях скважинных измерений. — *Методика и техника разведки*, 1967, № 59, с. 39—49. (ОНТИ ВИТР).

297. *Хлопонина Л. С.* Некоторые особенности электрических полей, связанных с нелинейной поляризацией электропроводящих минералов. — *Методика и техника разведки*, 1972, № 81, с. 64—74. (ОНТИ ВИТР).

298. *Храмьшин П. В., Лемец В. И., Жакупов Б. Е.* Применение метода вызванной поляризации на одном из полиметаллических месторождений Центрального Казахстана. — В кн.: *Применение метода вызванной поляризации при поисках рудных месторождений*. М., Недра, 1964, с. 97—102.

299. *Церман И. М., Овечкин В. В.* Эффективность применения комплекса геолого-геофизических методов при поисках золоторудных месторождений в Западном Карамазаре (на примере гор Калканата). — *Сов. геология*, 1966, № 8, с. 140—145.

300. *Чантуришвили Л. С.* О природе вызванной поляризации. — *Сообщения АН ГрузССР*, 1964, т. 34, № 2, с. 313—318.

301. *Шаповалов О. М.* Результаты применения метода вызванной поляризации на Южном Урале. — *Методика и техника разведки*, 1960, № 23, с. 67—76. (ОНТИ ВИТР).

302. *Шаповалов О. М.* Опыт применения метода вызванной поляризации. — *Разведка и охрана недр*, 1961, № 12, с. 35—41.

303. *Шаповалов О. М.* Применение метода вызванной поляризации на поисковом участке в Челябинской области. — В кн.: *Применение метода вызванной поляризации при поисках рудных месторождений*. М., Недра, 1964, с. 26—42.

304. *Шаповалов О. М.* Некоторые результаты модельных исследований по методу вызванной поляризации. — *Методика и техника разведки*, 1965, № 49, с. 91—107. (ОНТИ ВИТР).

305. *Шаповалов О. М.* Экспериментальное изучение переходных характеристик вызванной поляризации. — *Методика и техника разведки*, 1972, № 81, с. 15—21. (ОНТИ ВИТР).

306. *Шаповалов О. М., Черныш В. Ю., Кузьмичев В. В.* Метод переходных характеристик электромагнитного поля. — *Методы развед. геофизики*, 1976, вып. 26, с. 101—109. (Труды НПО «Геофизика»).

307. *Шаповалов О. М., Черныш В. Ю., Кузьмичев В. В.* Метод производной вызванной поляризации и его практическое значение. — *Методы развед. геофизики*, 1976, вып. 26, с. 86—95. (Труды НПО «Геофизика»).

308. *Шарапанов Н. Н., Черняк Г. Я.* Применение метода вызванной поляризации при гидрогеологических съемках и разведке подземных вод (методические рекомендации). М., Изд-во ВСЕГИНГЕО, 1972. 76 с.

309. *Шарапанов Н. Н., Черняк Г. Я., Барон В. А.* Методика геофизических исследований при гидрогеологических съемках с целью мелиорации земель. М., Недра, 1974. 173 с.

310. *Шатров Б. Б., Хлопонина Л. С., Афанасьев А. В.* Применение скважинного варианта метода вызванной поляризации на полиметаллическом месторождении в Северной Киргизии. — *Методика и техника разведки*, 1965, № 49, с. 129—134. (ОНТИ ВИТР).

311. *Шафаренко В. А., Чистякова Т. А.* Поле вызванной поляризации шара в двухслойной среде. — *Методика и техника разведки*, 1972, № 81, с. 41—49. (ОНТИ ВИТР).

312. *Шейнманн С. М.* Об установлении электромагнитных полей в Земле. — *Прикл. геофизика*, 1947, № 3, с. 3—35.

313. *Шейнманн С. М.* Современные физические основы теории электроразведки. Л., Недра, 1969. 224 с.

314. *Шкорбатов С. С.* Эффективность метода вызванной поляризации при поисках медно-никелевых месторождений на Кольском полуострове. — *Разведка и охрана недр*, 1963, № 2, с. 50—51.

315. Шлюмберже К. Подземная электрическая разведка. М.—Л., Объед. науч.-техн. изд-во, 1932. 74 с.
316. Шлюмберже К. О вызванной поляризации в скважинах. — Каротаж, различные операции в скважинах, 1934, вып. 6, с. 64—77.
317. Штифанов В. Ф., Канев А. Т., Черных Л. В. Открытие полиметаллического месторождения в Северо-Западном Каратау методом вызванной поляризации. — Бюл. науч.-техн. информ. Использование электроразведки при решении задач разведочной геофизики. М., ОНТИ ВИЭМС, 1968, с. 10—14 (Сер. Регион., развед. и промысл. геофизика, № 12).
318. Шербакова Т. В., Плюснин М. И. Автоматическая регистрация относительных вызванных потенциалов в скважине. — Развед. и промысл. геофизика, 1962, вып. 46, с. 96—101.
319. Электроразведка каротажа скважин/В. Н. Дахнов, А. И. Железняк, А. А. Коржев, Г. Я. Черняк. — Труды геол. бюро Главн. геол. развед. управления, 1948, вып. 3, с. 11—23.
320. Якубовский Ю. В. Электроразведка. М., Недра, 1973. 304 с.
321. Яновский Б. М. Земной магнетизм. Т. II. Теоретические основы магнитометрического метода исследования земной коры и геомагнитные измерения. Л. Изд-во Ленингр. ун-та, 1963. 462 с.
322. Ярославцев А. М. Результаты работ методом вызванной поляризации на медноколчеданных месторождениях Центрального Казахстана. — Методика и техника разведки, 1960, № 23, с. 40—49. (ОНТИ ВИТР).
323. Ярославцев А. М. Применение метода вызванной поляризации при комплексных геофизических поисках сульфидных месторождений в Центральном Казахстане. — В кн.: Применение метода вызванной поляризации при поисках рудных месторождений. М., Недра, 1964, с. 128—131.
324. Ярославцев А. М. Интерпретация графиков  $\eta_k$  ВЭЗ ВП. — Разведка и охрана недр, 1965, № 11, с. 50—52.
325. Ярославцев А. М. Методика приближенного расчета и интерпретации графиков  $\eta_k$  ВЭЗ ВП. — Геология и геофизика, 1967, № 2, с. 103—108.
326. Anders W. Versuche zur induzierten galvanischen Polarisation an Gesteinmodellen. — Freiburger Forschungshefte R. C., 1956, v. 28, s. 426—431.
327. Anders W. Beiträge zur Anwendung der induzierten Polarisation auf Fragen der geologischen Erkundung — Geophys. Geol., 1963, Folge 4, s. 90—95.
328. Anders W. Zur scheinbaren induzierten Polarisation im 2 Schichtfall bei Anwendung von Wechselstrom variabler Frequenz. — Geophys. Geol., 1963, Folge 5, s. 17—21.
329. Anders W. Zur Entwicklung eines Komplexen Erdungemessers. — Geophys. prosp., 1965, v. 13, N 4, p. 592—602.
330. Anderson L., Keller G. A study in induced polarization. — Geophys. prosp., 1964, v. 29, N 5, p. 848—864.
331. Bacon L. Induced polarization logging in the search for native copper. — Geophys., 1965, v. 30, N 2, p. 246—256.
332. Baldwin R. A decade of development in overvoltage surveying. — Min. Engng., 1959, v. 11, N 3, p. 307—314.
333. Barker R. A note on the induced polarization of the Bunter Sandstone. — Geoeexploration, 1975, v. 13, N 4, p. 227—233.
334. Belluigi A. The need of revising the apparatus employed in the measurement of an electrochemical effect of the ground. — Beiträge angewandte Geophys., 1935, Bd. 5, H 1—2, s. 167—177.
335. Bertin J. La polarisation provoquée et son rôle en recherches minières. — Ann., mines, 1969, v. 3, p. 9—56.
336. Bertin J., Loeb J. Experimental and theoretical aspects of induced polarization. V. 1. Presentation and application of the IP method case histories by J. Bertin, Berlin — Stuttgart, Gebrüder Borntraeger, 1976. 250 p.
337. Bhattacharyya B., Morrison H. Some theoretical aspects of electrode polarization in rocks. — Geophys. prosp., 1963, v. 11, N 2, p. 176—196.
338. Bleil D. Induced polarization: a method of geophysical prospecting. — Geophys., 1953, v. 23, N 3, p. 636—661.
339. Bodmer R., Ward S. On induced electrical polarization and groundwater. — Geophys., 1968, v. 33, N 5, p. 805—823.
340. Bowden F., Rideal E. Electrolytic behavior of thin films. — Proc. Royal Society, 1928, v. 120, p. 59—79.
341. Brant A. Examples of induced polarization field results in the time domain. — Min. Geophys. SEG, 1966, v. 1, p. 288—305.
342. Buchheim W. Theoretische Betrachtungen und Versuche zur Unterscheidung elektrolytischer von metallischer Stromleitung im Boden beim elektrischen Schürfen auf Sulfiderze. — Geol., 1954, Bd. 3, N 6/7, S. 1009—1035.
343. Buchheim W. Zur Theorie der induzierten galvanischen Polarisation elektrisch aktiver Imprägnationserze. — Freiburger Forschungshefte, R. C., 1956, 28, S. 5—14.
344. Buchheim W. Anwendungen der Methode der induzierten Polarisation an schwedischen Erzlagerstätten. — ZS. Geophys., 1957, H. 1, S. 26—33.
345. Buchheim W., Malmqvist D. Anwendungen der Methode der induzierten galvanischen Polarisation an Sulfiderzvorkommen des Skelleftebezirks in Nordschweden. Verhandlungen des XX Internationalen Geologen Kongresses in Mexico. — Geol., 1958, Bd. 7, N 1, S. 287—301.
346. Canziani B., Patella D. Induced polarization field surveys on deposits of pisolitic bauxite. — Geoeexploration, 1974, N 12, p. 235—240.
347. Coppolino S. Sulle modalità e possibilità d'impiego del metodo di prospezione elettrochimico (polarizzazione provocata). — Ind. mineraria, 1959, v. 10, N 3, p. 159—164.
348. Coppolino S., Petrucci G. Su alcune esperienze di prospezione per la ricerca dei minerali misti di piombo e zinco del Peloritani con i metodi della polarizzazione provocata, spontanea, e della resistenza apparente. — Riv. minerar. Siciliana, 1960, v. 11, N 6, p. 288—293.
349. Cowan D., Allchurch P., Omnes C. An integrated geoelectrical survey on the Kangaroo copper-zinc prospect. — Geoeexploration, 1975, 13 p. 77—98.
350. Datta S., Dey S. An equipment for induced polarisation measurements and some field results. — Geoeexploration, 1970, N 8, p. 87—96.
351. Dizioglu M. Eine Methode zur Bestimmung der wahren Polarisationssuszeptibilität vertikaler Unstetigkeiten und ihre Anwendung auf einige Typen von Blei-Zink-Erzen in der Türkei. — ZS. angew. Geol. 1967, Bd. 13, H. 11—2, S. 287—301.
352. Dizioglu M. A method for determining true chargeabilities of vertical discontinuities and its application for some types of lead-zinc ores in Turkey. — Gerlands Beiträge Geophys., 1968, Bd. 77, H. 3, S. 37—51.
353. Дойков Ж., Тумбеев Д. Эффективность на метода на предизвиканата поляризация на търсене на жилини сулфидни орудавания в района на Бакаджишкото и Върлибрежкото рудно находище. Сборник от доклади, изнесени на юбилейната научно-техническа конференция по проучвателна геофизика. София, Техника, 1972, с. 305—312.
354. Eadle E. Mineral exploration... The role of geology, geophysics and geochemistry in an integrated approach to mineral exploration. — Austr. Min., 1967, v. 59, N 2, p. 9—15.
355. Elliot C. Mining geophysical expenditures up 29% in 1966. — Min. Engng., 1967, v. 19, N 11, p. 75—76.
356. Erkel A., Bod M. A gerjesztett potenciál mérések eredményeinek kiértékelése, tekintettel a laboratóriumi közetvizsgálatokra. — Geofiz. közlemények, 1956, v. 1, p. 3—17.
357. Finzi-Contini G., Norinelli A. Studio per polarizzazione indotta de campioni di bauxite pisolitica. — Boll. geofis. teorica applicata, 1968, v. 10, N 39, p. 204—218.
358. Fountain D. Geophysical case histories of disseminated sulfide deposits in British Columbia. — Geophys., 1972, v. 37, p. 142—159.
359. Fountain D. The application of the induced polarization method at Brenda Mines, British Columbia. — Canad. Min. Metall. Bull., 1968, v. 61, N 670, p. 153—157.
360. Fraser D., Keevil N., Ward S. Conductivity spectra of rocks from Greigmont ore environment. — Geophys., 1964, v. 29, N 5, p. 832—847.

361. *Frische R., Buttlar H.* A theoretical study of induced electrical polarization. — *Geophys.*, 1957, v. 22, N 3, p. 688—706.
362. *Georgel L.* Polarisation provoquée et recherche minière. — *Bull. Bureau Recherches Géol. Min.*, 1967, N 5, p. 47—65.
363. *Gruntorád J.* Metoda vyzvané polarizace. — *Geol. průzkum*, 1964, N 12, S. 362—364.
364. *Gruntorád J., Knéz J.* Metodika a technika terenních prací methodou vyzvané polarizace. — *Geol. průzkum*, 1967, N 1, S. 10—13.
365. *Gruntorád J., Skácel J.* Einige Ergebnisse der geophysikalischen Forschung der Zone von Sterberk—Horní Benesov. — *Acta Univ. Carolinae, Geol.*, 1968, N 3, S. 237—252.
366. *Hallöf P.* Recent field applications of the variable frequency IP method. — *Proc. Geol. Assoc. Canada*, 1963, v. 15, Toronto, p. 91—111.
367. *Hallöf P.* A comparison of the various parameters employed in the variable-frequency induced polarization method. — *Geophys.*, 1964, v. 29, N 3, p. 425—433.
368. *Hallöf P.* Induced polarization and resistivity results from the Cactus deposit, Miami, Arizona. — *Min. Geophys.*, 1966, v. 1, SEG, p. 313—316.
369. *Hallöf P.* The use of induced polarization method to find ore under lake Chibougamau. — *Canadian Min. Metall. Bull.*, 1967, v. 6, N 661, p. 575—579.
370. *Hallöf P., Winniski E.* A geophysical case history of the Lakeshore ore body. — *Geophys.*, 1971, v. 36, N 5, p. 1232—1249.
371. *Heinrichs W.* The search for ore: geophysics in 1965. — *Min. Engng.*, 1966, v. 18, N 2, p. 77—78.
372. *Henkel J.* Some theoretical considerations on induced polarization. — *Geophys.*, 1958, v. 23, N 2, p. 299—304.
373. *Henkel J., Collins T.* Induced polarization in electrolyte saturated earth plugs. — *Geophys.*, 1961, v. 26, N 2, p. 205—210.
374. *Henkel J., Van-Nostrand R.* Experiments in induced polarization. — *Min. Engng.*, 1957, v. 9, N 3, p. 355—359.
375. *Hosking K.* The search for tin. — *Min. Mag.*, 1965, v. 113, N 6, p. 448—461.
376. *Keovil N., Ward S.* Electrolyte activity: its effect on induced polarization. — *Geophys.*, 1962, v. 27, N 5, p. 677—690.
377. *Lowell J., Guilbert J.* Lateral and vertical alteration zoning in porphyry ore deposits. — *Economic Geology*, 1970, v. 65, N 4, p. 373—408.
378. *Nabighian M., Elliot C.* Negative induced-polarization effects from layered media. — *Geophys.*, 1976, v. 41, N 6a, p. 1236—1255.
379. *Malmqvist D.* Eine Analyse des zeitlichen Verlaufs von Polarisationsindikationen nach einer Gleichstrommethode. — *Freiberger Forschungshefte, R. C.*, 1960, 81, s. 122—135.
380. *Marshall D., Madden T.* Induced polarization, a study of its causes. — *Geophys.*, 1959, v. 24, N 4, p. 790—816.
381. *Morineau Y.* La polarisation induite en milieu poreux. — In: — *Comptes rendus, deuxième colloque Assoc. rech. techn. forage, prod. Rueil-Malmaison*. Paris, 1965, p. 35—56.
382. *Müller M.* Die experimentale Bestimmung der Reaktionsgeschwindigkeit aktiver elektrischen Vorgänge im Erdboden. — *ZS. Geophys.*, 1932, H. 3, S. 423—425.
383. *Müller M.* Ein neues elektrisches Aufschlussverfahren mit grosser Tiefenwirkung. — *Beiträge angew. Geophys.*, 1934, H. 4, S. 302—315.
384. *Müller M.* Ergebnisse geoelektrischer Polarisationsmessungen. — *ZS. Geophys.*, 1940, Bd. 16, H. 7/8, S. 1110—1116.
385. *Nosske G.* Eine neue leichte Feldausrüstung für die induzierte Polarisation mit Gleichstromimpulsen. — *ZS. angew. Geol.*, 1959, Bd. 5, H. 11, S. 528—532.
386. *Nosske G.* Praktische Erfahrungen bei IP-Messungen mit kurzer Gleichstromimpulsen. — *ZS. angew. Geol.*, 1961, H. 5, S. 296—300.
387. *Orilia N., Petrucci G.* La polarizzazione provocata nel cemento consolidato e nell'argilla. — *Geof. Meteorol.*, 1957, v. 5, N 1—2, p. 22—24.
388. *Overvoltage* research and geophysical applications. Ld. — NY., Pergamon Press, 1959. Wait J. (editor), Baldwin R., Brant A. Collet L. a. o.
389. *Padgett P., Ek J., Eriksson L.* Vargisträsk, a case history in ore-prospecting. — *Geoexploration*, 1969, N 7, p. 163—175.
390. *Parasnis D.* Some aspects of geophysical prospecting for chromite. — In: *Méthodes prosp. chromite*. Paris, 1969, p. 225—231.
391. *Parker S., Gay I.* Geophysical exploration shows marked increase. — *Min. Engng.*, 1967, N 2, p. 69—74.
392. *Pelton W., Smith P.* Mapping porphyry copper deposits in the Philippines with IP. — *Geophys.*, 1976, v. 41, N 1, p. 106—122.
393. *Pemberton R.* World geophysical discoveries foster future mineral needs. — *Engng. Min. J.*, 1966, v. 167, N 4, p. 85—89.
394. *Petrucci G., Coppolino S.* La determinazione della costante di polarizzazione provocata e la sua applicazione alla prospezione delle formazioni geologiche. — *Geofis. meteorol.*, 1960, v. 8, N 3—4, p. 69—71.
395. *Prospecting* for ground water by induced electrical polarization. — *Geophys.*, 1957, v. 22, N 3, p. 16—67. V. Vacquier, C. Holmes, P. Kintzinger, M. Laveigne.
396. *Rösler R.* Die galvanisch induzierte Polarisation an Dispersion rotationsellipsoidischer Teilchen. — *Freiberger Forschungshefte, R. C.*, 1959, 67, s. 480.
397. *Roussel J.* Etude sur modèles réduites des phénomènes de polarisation provoquée à la recherche des gîtes métallifères à faible teneur. — *Ann. Géophys.*, 1967, v. 23, N 3, p. 360—371.
398. *Roussel J.* Application de la technique transitoire de polarisation provoquée à la recherche de gîtes métallifères à faible teneur. — *Ann. Géophys.*, 1967, v. 23, N 3, p. 413—431.
399. *Roussel J., Tournier D.* Exemple d'application des phénomènes transitoires de polarisation provoquée de sous-sol à la recherche de gîtes métallifères. — *Acad. Sci. Comptes Rendus, Ser. B*, 1966, v. 263, N 22, p. 1268—1271.
400. *Rulski S.* Proba lokalizowania mineralizacji polimetalicznej za pomocą paratur Sharpe'a. — *Techn. poszuk.*, 1967, 6, N 21, p. 20—25.
401. *Schillinger A.* Calumet successfully uses IP probe underground to boost ore discoveries. — *Min. Engng.*, 1964, v. 16, N 11, p. 83—88.
402. *Schrage I.* Experimentelle Untersuchungen zur induzierten galvanischen Polarisation an Sulfiderzen und graphitführenden Gesteinen. — *Freiberger Forschungshefte, R. C.*, 1956, 28, p. 432—438.
403. *Schufle J.* Cation exchange and electrical polarization. — *Geophys.*, 1959, v. 24, N 1, p. 164—176.
404. *Seigel H.* Mathematical formulation and type curves for induced polarization. — *Geophys.*, 1959, v. 24, N 3, p. 547—565.
405. *Seigel H.* Induced polarization and its role in mineral exploration. — *Canadian Min. Metall. Bull.*, 1962, v. 55, N 600, p. 242—249.
406. *Seigel H.* Three recent Irish discovery case histories using pulse-type induced polarization. — *Canadian Min. Metall. Bull.*, 1965, v. 58, N 643, p. 1179—1184.
407. *Seigel H.* Magnetic induced polarization method. — *Geophys.*, 1974, v. 39, N 3, p. 321—339.
408. *Seigel H., Hill H., Baird J.* Discovery case history of the Pyramid ore bodies, Pine Point, Northwest territories, Canada. — *Geophys.*, 1968, v. 33, N 4, p. 645—656.
409. *Sillitoe R.* A plate tectonic model for the origin of porphyry copper deposits. — *Economic Geology*, 1972, v. 67, p. 184—197.
410. *Sillitoe P.* The tops and bottoms of porphyry copper deposits. — *Economic Geology*, 1973, v. 68, p. 799—815.
411. *Šumi F.* Geophysical exploration in mining by induced polarization. — *Geophys. prosp.*, 1959, v. 7, N 3, p. 300—310.
412. *Šumi F.* The induced polarization method in ore investigation. — *Geophys. prosp.*, 1961, v. 9, N 3, p. 459—477.
413. *Šumi F.* Prospecting for nonmetallic minerals by induced polarization. — *Geophys. prosp.*, 1965, v. 13, N 4, p. 592—602.
414. *Šumner J.* Geophysical exploration for porphyry copper deposits. Joint Meeting MMIJ-AIME, 1972. Tokyo, print N T1, c. 2, p. 1—11.

415. Sumner J. Principles of IP for geophysical exploration. Amsterdam Elsevier Scientific Publishing Co, 1976. 277 p.
416. Takubo I. On the electrolytic polarization of some iron minerals. — Mem. College Sci. Kyoto Imp. Univ., 1934, v. 10, N 1, p. 15—28.
417. Tournier D., Vajdea V. Recherches experimentales et théoretiques par les méthodes de polarisation provoquée et de résistivité appliquées à la prospection de gisements de bauxite. — Bull., Bur. Recherches Géol. et Minières, 1969, ser. 2, N 4, p. 63—69.
418. Vajdea V. Aufhebung der Ambiguität einiger geoelektrischen Turam-Anomalien durch die Methode der induzierten Polarisation. — Rev. roumaine géol., géophys., géogr. Ser. géophys, 1965, v. 9, N 1, p. 113—122.
419. Wagg D., Seigel H. Induced polarization in drill holes. — Canadian Mining, 1963, v. 84, N 4, p. 54—58.
420. Wait J. Discussion on «A theoretical study of induced electrical polarization». — Geophys., 1958, v. 23, N 1, p. 144—153.
421. Weiss O. The limitations of geophysical methods and new possibilities opened by electrochemical methods for determining geological formations at great depths. — Proc. World Petroleum Congress, Ltd., 1933, v. 1, p. 114—118.
422. Wishaw Q. Prospecting for porphyry-type copper deposits in Arizona. — Canadian Min. Journ., 1963, v. 84, N 4, p. 67—69.
423. Wöbking H. Effekte der induzierten Polarisation an bleiglanzhaltigen sandproben. — Gerlands Beiträge zur Geophysik, 1974, Bd. 83, H. 6, S. 459—481.
424. Zonge K., Sauck W., Sumner J. Comparison of time, frequency and phase measurements in induced polarization. — Geophys. prosp. 1972, v. 20, N 3, p. 628—648.
425. Янев В. Об ефективност на метода РР в Спahiевското рудно поле. — Изв. Геол. ин-т Бълг. АН. Сер. прил. геофиз., 1972, т. XXI, с. 66—72.
426. Янев В., Хитов Г. Комплексни геолого-геофизични изследвания за установяване местоположението на метасоматичните рудни тела в района на Ардино (Централни Родопи). — Изв. Геол. ин-т Бълг. АН Сер. прил. геофиз., 1971, т. XIX—XX, с. 31—42.

|                                                                                              |            |
|----------------------------------------------------------------------------------------------|------------|
| Предисловие к первому изданию . . . . .                                                      | 3          |
| Предисловие ко второму изданию . . . . .                                                     | 4          |
| Введение . . . . .                                                                           | 5          |
| <b>I. ТЕОРЕТИЧЕСКИЕ И ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ ДАННЫЕ О ПРИРОДЕ ВП ГОРНЫХ ПОРОД И РУД . . . . .</b> | <b>13</b>  |
| <b>ВП электронных проводников . . . . .</b>                                                  | <b>15</b>  |
| Общие положения . . . . .                                                                    | —          |
| Методика и техника опытов . . . . .                                                          | 19         |
| Результаты опытов . . . . .                                                                  | 22         |
| Выводы . . . . .                                                                             | 33         |
| <b>ВП неопроводящих пород . . . . .</b>                                                      | <b>35</b>  |
| Поляризация кварцевого песка . . . . .                                                       | —          |
| Поляризация глин и других осадочных пород . . . . .                                          | 42         |
| Поляризация кристаллических пород . . . . .                                                  | 46         |
| Теоретические представления . . . . .                                                        | 51         |
| Выводы . . . . .                                                                             | 56         |
| <b>ВП пород, содержащих электропроводящие включения . . . . .</b>                            | <b>57</b>  |
| Поляризация кварцевого песка с включениями электронных проводников . . . . .                 | —          |
| Поляризация образцов вкрапленных руд . . . . .                                               | 59         |
| Выводы . . . . .                                                                             | 62         |
| <b>Временные характеристики ВП . . . . .</b>                                                 | <b>63</b>  |
| Общие положения . . . . .                                                                    | —          |
| Временной закон ВП . . . . .                                                                 | 64         |
| Взаимосвязь ВП во время зарядки и разрядки . . . . .                                         | 67         |
| Связь ВП, создаваемой постоянным и переменным током . . . . .                                | 75         |
| Напряжение ВП в случае импульса тока произвольной формы . . . . .                            | 86         |
| Выводы . . . . .                                                                             | 88         |
| <b>II. ТЕОРЕТИЧЕСКИЕ РАСЧЕТЫ И МОДЕЛИРОВАНИЕ ПОЛЕЙ ВП . . . . .</b>                          | <b>90</b>  |
| <b>Общие положения. Поле ВП в однородных средах . . . . .</b>                                | <b>91</b>  |
| Исходные уравнения . . . . .                                                                 | —          |
| Поле ВП в однородной изотропной среде . . . . .                                              | 97         |
| Поляризуемость однородной среды, содержащей сферические включения . . . . .                  | 98         |
| Временные характеристики поляризуемости . . . . .                                            | 101        |
| Поляризуемость однородной среды, содержащей сферические включения . . . . .                  | 105        |
| Основные способы расчета кажущейся поляризуемости . . . . .                                  | 107        |
| Средняя поляризуемость слоистой среды . . . . .                                              | 109        |
| Кажущаяся поляризуемость однородной анизотропной среды . . . . .                             | 111        |
| Выводы . . . . .                                                                             | 113        |
| <b>ВП тел шаровой формы . . . . .</b>                                                        | <b>114</b> |
| Электропроводящая сфера в однородном поле . . . . .                                          | —          |
| Электропроводящая сфера в поле точечного источника тока . . . . .                            | 120        |

|                                                                      |            |
|----------------------------------------------------------------------|------------|
| Объемно поляризованный шар в поле точечного источника тока . . . . . | 123        |
| Профилирование над шаром . . . . .                                   | 126        |
| Измерения поля ВП при неподвижном источнике тока . . . . .           | 131        |
| Измерения поля ВП с использованием скважин . . . . .                 | 133        |
| Шар в двухслойной среде . . . . .                                    | 138        |
| Соотношение поверхностной и объемной поляризации . . . . .           | 140        |
| Роль ореола рудной вкрапленности, окружающей сплошные руды . . . . . | 142        |
| Выводы . . . . .                                                     | 143        |
| ВП тел сфероидальной формы . . . . .                                 | 144        |
| Сфероид в однородном поле, параллельном его осям . . . . .           | —          |
| Сфероид в однородном поле, не параллельном его осям . . . . .        | 150        |
| Сфероид в поле точечного источника тока . . . . .                    | 151        |
| Выводы . . . . .                                                     | 154        |
| ВП тел пластообразной формы . . . . .                                | 155        |
| Двухслойная среда . . . . .                                          | —          |
| Трехслойная среда . . . . .                                          | 158        |
| Многослойная среда . . . . .                                         | 161        |
| Вертикальный контакт двух сред . . . . .                             | 163        |
| Вертикальный пласт в однородном поле . . . . .                       | 165        |
| Профилирование над пластом . . . . .                                 | 169        |
| Выводы . . . . .                                                     | 171        |
| ВП вытянутых тел с произвольным сечением . . . . .                   | 172        |
| Моделирование ВП рудных тел . . . . .                                | 173        |
| Критерии подобия полей ВП электронных проводников . . . . .          | —          |
| Критерии подобия полей ВП объемно поляризованных тел . . . . .       | 175        |
| Лабораторная установка . . . . .                                     | 176        |
| Результаты опытов . . . . .                                          | 177        |
| Выводы . . . . .                                                     | 185        |
| <b>III. МЕТОДИКА И ТЕХНИКА ПОЛЕВЫХ РАБОТ . . . . .</b>               | <b>186</b> |
| Основные требования к аппаратуре . . . . .                           | —          |
| Измерительные электроды . . . . .                                    | 187        |
| Измерительный прибор . . . . .                                       | 189        |
| Источник поляризующего тока . . . . .                                | 191        |
| Токовые электроды . . . . .                                          | 192        |
| Провода для токовой и измерительной линий . . . . .                  | 193        |
| Устройство аппаратуры для работ на постоянном токе . . . . .         | —          |
| Блок-схема . . . . .                                                 | 194        |
| Источник тока . . . . .                                              | —          |
| Измерительный прибор . . . . .                                       | 195        |
| Коммутирующие устройства . . . . .                                   | —          |
| Оборудование . . . . .                                               | 196        |
| Принцип действия аппаратуры . . . . .                                | —          |
| Станция СВП-74 . . . . .                                             | 199        |
| Назначение и технические характеристики . . . . .                    | —          |
| Структурная схема . . . . .                                          | 200        |
| Тиристорный коммутатор . . . . .                                     | 203        |
| Стабилизатор тока . . . . .                                          | 205        |
| Блок управления . . . . .                                            | 207        |
| Измерительные приборы . . . . .                                      | 208        |
| Порядок работы со станцией . . . . .                                 | 210        |
| Станция ВП-Ф . . . . .                                               | 212        |
| Назначение и технические характеристики . . . . .                    | —          |
| Структурная схема . . . . .                                          | 213        |
| Производство работ . . . . .                                         | 215        |
| Схемы расположения электродов . . . . .                              | —          |

|                                                                                                         |            |
|---------------------------------------------------------------------------------------------------------|------------|
| Разнос электродов . . . . .                                                                             | 224        |
| Особенности скважинных измерений . . . . .                                                              | 226        |
| Временной режим измерений . . . . .                                                                     | 229        |
| Обработка результатов измерений . . . . .                                                               | 233        |
| <b>IV. МЕТОДИКА ИСТОЛКОВАНИЯ АНОМАЛИЙ ВП . . . . .</b>                                                  | <b>243</b> |
| Выделение аномалий кажущейся поляризуемости . . . . .                                                   | —          |
| Общие принципы . . . . .                                                                                | —          |
| Региональные и локальные аномалии . . . . .                                                             | 244        |
| Специфика скважинных аномалий . . . . .                                                                 | 249        |
| Определение формы и горизонтальных размеров поляризуемых тел . . . . .                                  | 250        |
| Определение глубины залегания тел . . . . .                                                             | 254        |
| Определение падения и других элементов залегания тел . . . . .                                          | 257        |
| Определение положения тел в окоскважинном пространстве . . . . .                                        | 259        |
| Определение поляризуемости и электропроводности тел . . . . .                                           | 263        |
| Определение содержания электропроводящих минералов в теле. Оценка перспективности аномалий ВП . . . . . | 265        |
| <b>V. ПРИМЕНЕНИЕ МЕТОДА ВП ПРИ ПОИСКАХ И РАЗВЕДКЕ МЕСТОРОЖДЕНИЙ ПОЛЕЗНЫХ ИСКОПАЕМЫХ . . . . .</b>       | <b>271</b> |
| Принципиальные возможности метода ВП . . . . .                                                          | —          |
| Различия поляризуемости пород и руд . . . . .                                                           | 272        |
| Размер тел и глубина исследований . . . . .                                                             | 275        |
| Влияние неоднородности пород и рельефа местности . . . . .                                              | 278        |
| Распространение электропроводящих минералов в рудах месторождений промышленных типов . . . . .          | 283        |
| Месторождения черных металлов . . . . .                                                                 | 289        |
| Железо . . . . .                                                                                        | —          |
| Марганец . . . . .                                                                                      | 295        |
| Хром . . . . .                                                                                          | 297        |
| Титан . . . . .                                                                                         | 299        |
| Месторождения легких металлов . . . . .                                                                 | —          |
| Алюминий . . . . .                                                                                      | —          |
| Месторождения цветных металлов . . . . .                                                                | 302        |
| Медь . . . . .                                                                                          | 303        |
| Свинец и цинк (полиметаллы) . . . . .                                                                   | 316        |
| Никель . . . . .                                                                                        | 326        |
| Сурьма . . . . .                                                                                        | 334        |
| Месторождения редких металлов . . . . .                                                                 | 336        |
| Олово . . . . .                                                                                         | 337        |
| Вольфрам и молибден . . . . .                                                                           | 340        |
| Ртуть . . . . .                                                                                         | 345        |
| Месторождения благородных металлов . . . . .                                                            | 348        |
| Золото . . . . .                                                                                        | 349        |
| Месторождения неметаллических полезных ископаемых . . . . .                                             | 355        |
| Графит . . . . .                                                                                        | —          |
| Слюда . . . . .                                                                                         | 356        |
| Родонит . . . . .                                                                                       | 358        |
| Корунд . . . . .                                                                                        | 359        |
| Фосфориты . . . . .                                                                                     | —          |
| Месторождения нефти и газа . . . . .                                                                    | 360        |
| Гидрогеологические и инженерно-геологические исследования . . . . .                                     | 363        |
| Заклучение . . . . .                                                                                    | 366        |
| Список литературы . . . . .                                                                             | 368        |

# I

## ТЕОРЕТИЧЕСКИЕ И ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ ДАННЫЕ О ПРИРОДЕ ВП ГОРНЫХ ПОРОД И РУД

Разработка метода ВП с самого начала затруднялась тем, что электрохимические процессы, происходящие в горных породах и рудах, были вне круга интересов «большой науки». Начиная с К. Шлюмберже, геофизики вынуждены были, исходя из собственного опыта, строить теоретические гипотезы о природе ВП, поневоле вторгаясь в сферу науки, где они были дилетантами. Экспериментальный подход к выяснению закономерностей ВП преобладает до сих пор. Лишь теоретические исследования сотрудников кафедры коллоидной химии ЛГУ, возглавляемой профессором Д. А. Фридрихсбергом [289], являются исключением из этого правила.

Вызванная поляризация как одно из проявлений электрохимических свойств горных пород и руд находится в тесной связи с их составом и структурой. Горные породы, как известно, представляют собой сложные агрегаты твердого вещества, жидкости и газа. По характеру электропроводности компоненты пород являются изоляторами, электронными \* и ионными проводниками.

К изоляторам относится твердое вещество большинства породообразующих минералов, удельное сопротивление которых превышает  $10^8$  Ом·м [28, 121, 160], и находящийся в порах породы газ, сопротивление которого еще выше. К электронным проводникам, отличающимся низким удельным сопротивлением от  $10^{-6}$  до  $10^{-2}$  Ом·м, относятся многие рудные минералы: большинство сульфидов, магнетит, пиролюзит, а также графит, антрацит и шунгит [28, 256]. Перечень электропроводящих минералов, составленный Ю. С. Рыссом и автором [139], дан в табл. 1.

\* С точки зрения современной электрофизики, минералы являются полупроводниками и могут иметь не только электронную, но и дырочную проводимость. Для рассматриваемых процессов ВП эта особенность минералов роли не играет.

ТАБЛИЦА 1  
Электропроводящие минералы

| Минерал                                     | Химическая формула                    | Минерал        | Химическая формула                                    |
|---------------------------------------------|---------------------------------------|----------------|-------------------------------------------------------|
| Аргентит                                    | $\text{Ag}_2\text{S}$                 | Метациннабарит | $\text{HgS}$                                          |
| Арсенопирит                                 | $\text{FeAsS}$                        | Миллерит       | $\text{NiS}$                                          |
| Борнит                                      | $\text{Cu}_5\text{FeS}_4$             | Молибденит     | $\text{MoS}_2$                                        |
| Бравойт                                     | $(\text{Ni}, \text{Fe})\text{S}_2$    | Никелин        | $\text{NiAs}$                                         |
| Буланжерит                                  | $\text{Pb}_5\text{Sb}_4\text{S}_{11}$ | Пентландит     | $(\text{Fe}, \text{Ni})_9\text{S}_8$                  |
| Валлерит                                    | $\text{CuFeS}_2$                      | Пирит          | $\text{FeS}_2$                                        |
| Виоларит                                    | $\text{Ni}_2\text{FeS}_4$             | Пирролизит     | $\text{MnO}_2$                                        |
| Ваэсит                                      | $\text{NiS}_2$                        | Пирротин       | $\text{FeS}$                                          |
| Вюртцит                                     | $\text{ZnS}$                          | Платина        | $\text{Pt}$                                           |
| Галенит                                     | $\text{PbS}$                          | Платтнерит     | $\text{PbO}_2$                                        |
| Гаусманит                                   | $\text{Mn}_3\text{O}_4$               | Полибазит      | $(\text{Ag}, \text{Cu})_{16}\text{Sb}_2\text{S}_{11}$ |
| Герсдорфит                                  | $\text{NiAsS}$                        | Полидимит      | $\text{Ni}_3\text{S}_4$                               |
| Гитамит                                     | $(\text{FeNi})\text{As}_3$            | Ртуть          | $\text{Hg}$                                           |
| Глаукодит                                   | $(\text{Co}, \text{Fe})\text{AsS}$    | Серебро        | $\text{Ag}$                                           |
| Графит и уголь<br>(аморфный уг-<br>лерод) * | $\text{C}$                            | Смальтин       | $\text{CoAs}_2$                                       |
| Данаит                                      | $(\text{Fe}, \text{Co})\text{AsS}$    | Скуттерудит    | $(\text{Co}, \text{Ni})_4\text{As}_4\text{I}_3$       |
| Джемсонит                                   | $\text{PbFeSb}_6\text{S}_{14}$        | Сперрилит      | $\text{PtAs}_2$                                       |
| Золото                                      | $\text{Au}$                           | Станнин        | $\text{Cu}_2\text{FeSnS}_4$                           |
| Ильменит                                    | $\text{FeTiO}_3$                      | Теннантит      | $\text{Cu}_{12}\text{As}_4\text{S}_{13}$              |
| Кобальтин                                   | $\text{CoAsS}$                        | Тетрадимит     | $\text{Bi}_2\text{Te}_2\text{S}$                      |
| Ковеллин                                    | $\text{CuS}$                          | Тетраздрит     | $\text{Cu}_{12}\text{Sb}_4\text{S}_{13}$              |
| Кубанит                                     | $\text{CuFeS}_2$                      | Тиллит         | $\text{PbSnS}_2$                                      |
| Курнакит                                    | $\text{Mn}_2\text{O}_3$               | Титаномагнетит | $m\text{FeTiO}_3 \cdot n\text{Fe}_3\text{O}_4$        |
| Леллингит                                   | $\text{FeAs}_2$                       | Халькозин      | $\text{Cu}_2\text{S}$                                 |
| Магнетит                                    | $\text{Fe}_3\text{O}_4$               | Халькопирит    | $\text{CuFeS}_2$                                      |
| Марказит                                    | $\text{FeS}_2$                        | Хлоантит       | $(\text{Ni}, \text{CoAs}_3)$                          |
| Медь самородная                             | $\text{Cu}$                           | Энаргит        | $\text{Cu}_3\text{AsS}_4$                             |
|                                             |                                       | Ялпаит         | $\text{Ag}_3\text{CuS}_2$                             |

Минералы, некоторые разности которых обладают электронной проводимостью \*\*

|              |                                                                      |            |                                                       |
|--------------|----------------------------------------------------------------------|------------|-------------------------------------------------------|
| Антимонит    | $\text{Sb}_2\text{S}_3$                                              | Касситерит | $\text{SnO}_2$                                        |
| Браунит      | $\text{Mn}_2\text{O}_3(\text{Fe}, \text{Mn}, \text{Mg})\text{SiO}_2$ | Манганит   | $\text{MnO}(\text{OH})$                               |
| Бурнонит     | $\text{PbCuSbS}_3$                                                   | Псиломелан | $\text{BaMnMn}_2\text{O}_2 \cdot 3\text{H}_2\text{O}$ |
| Висмутин     | $\text{Bi}_2\text{S}_3$                                              | Сфалерит   | $\text{ZnS}$                                          |
| Гематит      | $\text{Fe}_2\text{O}_3$                                              | Франклинит | $(\text{Zn}, \text{Mn})\text{Fe}_2\text{O}_4$         |
| Герценбергит | $\text{SnS}$                                                         | Якобит     | $\text{Fe}_2\text{O}_4$                               |

\* Присутствие графита и угля обуславливает высокую поляризационную способность антрацита, шунгита, многих сортов каменного угля, углистых и графитизированных сланцев и т. д.

\*\* Электронная проводимость этих минералов обычно определяется примесью в них микроскопических включений других вышеперечисленных минералов.

Ионными проводниками являются водные растворы электролитов, заполняющие поры в породе. Удельное сопротивление растворов зависит от концентрации электролита и колеблется от 0,1 до 400 Ом·м [83, 160]. ВП создается электрическим током, проходящим через систему заполненных раствором капилляров и пор в породах и пересекающим электронные проводники в случае их присутствия. ВП не обнаруживается в отдельно взятом растворе, так же как и в электронном проводнике. Она возникает в пограничном слое между твердым веществом и жидкостью \* и служит неотъемлемым свойством двухфазной среды. ВП можно определить как электрохимическое явление, происходящее в горных породах и рудах под действием электрического тока и сопровождаемое возникновением вторичных электродвижущих сил. Электродвижущие силы ВП создают вторичный ток, который в пограничном слое направлен противоположно первичному току.

Процессы ВП различаются в случаях, когда твердое вещество — изолятор или электронный проводник. Существенно различна и методика опытов в том и другом случае.

## ВП ЭЛЕКТРОННЫХ ПРОВОДНИКОВ

### Общие положения

Многие свойства ВП можно обнаружить с помощью простой лабораторной установки, схема которой показана на рис. 3. Образец, имеющий форму пластины, помещается в заполненную электролитом ванну так, что полностью перегораживает ее. Для этого стыки образца с ванной закрываются изоляционной замазкой, например пластилином. Весь ток, поступающий от электрической батареи в ванну через токовые электроды *A* и *B*, должен пройти через образец. К измерительным электродам *M* и *N* подключен измерительный прибор *PV* с высоким входным сопротивлением (1—3 МОм).

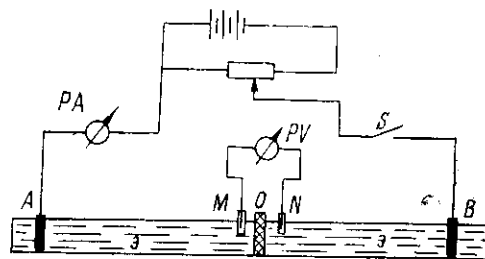
Если, как показано на рис. 3, образец находится между измерительными электродами, то после включения тока сначала наблюдается скачок напряжения, соответствующий его падению на омическом сопротивлении участка цепи между измерительными электродами, а затем рост напряжения, замедляющийся с течением времени (рис. 4, а). Сила тока при этом уменьшается тем заметнее, чем меньше э. д. с. источника поляризующего тока. После размыкания токовой цепи сначала напряжение скачкообразно уменьшается (на значение, равное его росту в момент включения тока), а затем постепенно спадает до нуля (рис. 4, б).

Если образец находится в стороне от измерительных электродов, то напряжение во время пропускания тока несколько умень-

\* Вопрос о влиянии газа и существовании ВП сред, состоящих из жидкости и газа, совершенно не изучен. Некоторые данные о процессах в водно-нефтяных эмульсиях получены на кафедре коллоидной химии ЛГУ.

Рис. 3. Схема простейшей установки для лабораторных исследований ВП электронных проводников.

РА — миллиамперметр; А и В — токовые электроды; М и N — измерительные электроды; PV — милливольтметр; э — электролит; О — образец; S — ключ.



шается, а после размыкания токовой цепи мгновенно падает до нуля (рис. 4, в).

Вторичная э. д. с., относительно медленно спадающая после выключения поляризующего поля, называется электродвижущей силой вызванной поляризации (э. д. с. ВП). Она появляется под действием тока, возрастает по мере его пропускания и служит причиной уменьшения тока. При изменении расстояния MN значение э. д. с. ВП в рассматриваемых условиях не меняется, если только образец остается между электродами. Между тем омическое сопротивление электролита пропорционально расстоянию MN, и падение напряжения на нем может быть сделано весьма малым при расположении измерительных электродов вплотную к образцу.

Если между измерительными электродами поместить несколько электронных проводников, разделенных раствором, то наблюдаемая э. д. с. ВП оказывается примерно пропорциональной числу границ электронного и ионного проводников (табл. 2).

Указанные особенности ВП отображены на рис. 5 эквивалентной электрической схемой, в которой электролит заменен цепочкой последовательно включенных сопротивлений, а электропроводящий образец — гальваническим элементом с меняющейся э. д. с., включенной навстречу э. д. с. источника поляризующего тока. При этом справедливо выражение закона Ома в обобщенной форме, учитывающей сторонние э. д. с. Сила тока в токовой цепи удовлетворяет уравнению

$$I = (U_{AB} - \mathcal{E}_{AB}) / R_{AB}, \quad (1)$$

где  $U_{AB}$  — э. д. с. источника поляризующего тока;  $R_{AB}$  — полное омическое сопротивление цепи;  $\mathcal{E}_{AB}$  — э. д. с. ВП, действующая в той же цепи АВ и слагаемая из ВП образца и токовых электродов.

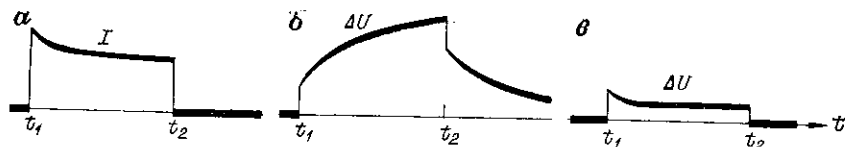
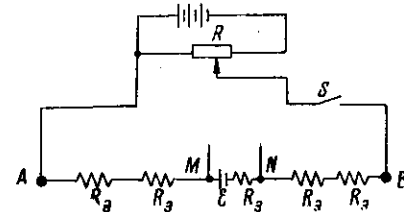


Рис. 4. Сила тока  $I$  в линии (а) и разность потенциалов при расположении образца между измерительными электродами (б) и вне их (в).  $t_1$ ,  $t_2$  — моменты включения и выключения тока.

Рис. 5. Эквивалентная электрическая схема поляризуемого образца, соответствующая установке, показанной на рис. 3.

$\mathcal{E}$  — э. д. с. ВП;  $R_э$  — омическое сопротивление электролита.



Разность потенциалов между измерительными электродами равна сумме падения напряжения на омическом сопротивлении и э. д. с. ВП на соответствующем участке MN токовой цепи:

$$\Delta U = \Delta U_0 + \Delta U_{ВП}, \quad (2)$$

причем первое слагаемое пропорционально силе тока и омическому сопротивлению:  $\Delta U_0 = IR_{MN}$ . Оно меняется при изменении тока, порождаемом эффектами ВП.

ВП токовых электродов и образца имеет одинаковую природу, и, зная законы ВП, можно сделать влияние токовых электродов достаточно малым. Для простоты рассуждений пока мы этим влиянием пренебрежем. ВП образца является функцией поляризующего тока и времени его действия. При достаточно малом значении этих аргументов, как показывают опыты, э. д. с. ВП пропорциональна току:

$$\mathcal{E} = AI, \quad (3)$$

где коэффициент  $A$  играет роль поляризационного сопротивления\*, и полное напряжение на измерительных электродах остается пропорциональным току:

$$\Delta U = (R_{MN} + A)I. \quad (4)$$

Возникновение ВП связано с законами электролиза, открытыми М. Фарадеем. Постоянный ток может протекать через границу

ТАБЛИЦА 2

Э. д. с. ВП в зависимости от количества латунных пластин (по данным Н. А. Пишпаревой), мВ

| Пластинки           | Количество пластин |   |    |     |    |    |    |
|---------------------|--------------------|---|----|-----|----|----|----|
|                     | 1                  | 2 | 3  | 4   | 5  | 6  | 7  |
| Разобщены раствором | 5                  | 7 | 10 | 14  | 16 | 20 | 23 |
| Закорочены          | 5                  | 6 | 6  | 6,5 | 7  | 7  | 7  |

Раствор — водопроводная вода; плотность тока — 2,9 мкА/см²; время зарядки — 2 мин; время разрядки — 0,5 с.

\* Этот коэффициент В. Н. Дахнов [83] назвал электрохимической активностью.

электронного и ионного проводников, если на ней происходит разрядка ионов. Но для разрядки ионы должны обладать определенной энергией сверх той, которую они имеют при отсутствии тока. Дополнительная энергия получила название перенапряжения.

Из исследований В. В. Кормильцева и В. В. Жаворонковой [92—94] складывается следующая картина механизма ВП. Э. д. с. ВП — это перенапряжение при электролизе раствора у поверхности электропроводящего минерала, которое обуславливает протекание электрохимической реакции с конечной скоростью по ряду причин.

Скорость реакции (т. е. ток разряда ионов) всегда конечна, потому что имеется ограниченное число ионов с энергией, достаточной для преодоления потенциального барьера между твердой и жидкой фазами. Прикладываемый потенциал поляризующего поля сообщает ионам дополнительную энергию, которая может оказаться достаточной для преодоления потенциального барьера и разряда ионов. Соответствующий потенциал называется перенапряжением разряда.

На поверхности минерала может находиться некоторое количество промежуточных продуктов реакции, особенно в том случае, когда для образования конечного продукта требуется изменить валентность ионов на несколько единиц. Присоединение одновременно двух или трех электронов маловероятно. Вначале валентность меняется на единицу и образуется промежуточный продукт реакции, адсорбированный на поверхности минерала. Затем происходит дальнейшее изменение валентности и получается конечный продукт. Твердая и жидкая фазы образуют динамическую систему, равновесие которой заключается в эквивалентном обмене зарядами, поэтому промежуточные продукты всегда имеются на поверхности раздела фаз. Если вторая реакция, приводящая к образованию конечного продукта, характеризуется большим перенапряжением разряда, чем первая, в которой образуется промежуточный продукт, то наложение внешнего потенциала приводит к увеличению степени заполнения поверхности минерала промежуточными продуктами электролиза. Они накапливаются до тех пор, пока скорости реакций не выравняются и тем самым не будет обеспечено непрерывное протекание тока при новом, более высоком потенциале. Соответствующее перенапряжение называется перенапряжением адсорбции.

Число ионов, обладающих необходимой для разряда энергией, при прочих равных условиях пропорционально концентрации ионов у поверхности минерала. Под действием тока концентрация ионов, участвующих в реакции, уменьшается, для поддержания прежней плотности тока необходимо увеличить прикладываемое извне напряжение. Такое перенапряжение называется перенапряжением диффузии (или концентрационной поляризацией), поскольку транспортировка ионов в растворе частично или полностью осуществляется за счет диффузии.

Указанные виды перенапряжения (разряда, адсорбции и диффузии) не исчерпывают полноты явления ВП, но являются основными и обнаруживаются в каждой электрохимической реакции. Время их релаксации различно. Быстрее всего устанавливается перенапряжение разряда, которое длится 2—10 мс после наложения внешнего потенциала и связано с емкостью двойного электрического слоя на границе фаз, составляющей 1—4 мкФ/см<sup>2</sup>.

Процесс установления перенапряжения адсорбции связан с псевдоемкостью. Приставка псевдо вводится потому, что этот процесс лишь внешне сходен с зарядом емкости двойного слоя. При заряде емкости двойного слоя ионы не разряжаются, а накапливаются в жидкой обкладке. В процессе адсорбции происходит поэтапный разряд ионов. Максимальная теоретическая псевдоемкость составляет около 1500 мкФ/см<sup>2</sup>, а наиболее вероятные значения 75—300 мкФ/см<sup>2</sup>. Время релаксации перенапряжения адсорбции 100—200 мс.

Наиболее медленно устанавливается концентрационная поляризация, время релаксации которой составляет в зависимости от скорости диффузии от единиц секунд до нескольких минут.

#### Методика и техника опытов

Лабораторная установка, схема которой показана на рис. 3, использована многими исследователями. Правда, не

всегда образец полностью перегораживал путь электрическому току. В частности, так провели свои опыты в ЗабНИИ \* А. П. Карасев, Р. С. Сейфуллин и другие по изучению ранней стадии ВП — в интервале 100 мкс—20 мс [233]. Образцы (размером несколько сантиметров) помещали на дно ванны, а измерительные электроды — над краями образца. Образцами служили различные металлы и сульфиды.

Схемы трех других установок приведены на рис. 6. Первая из них, с которой в 1955 г. работал М. В. Семенов, служит для прямых измерений э. д. с. ВП на поверхности исследуемого электрода, аналогично тому, как это делается в классических электрохимических исследованиях [71, 118]. В опытах М. В. Семенова регистрирующим прибором служил шлейфный осциллограф, снабженный гальванометрами, имеющими собственную частоту 20 Гц, и предварительным усилителем постоянного тока, имеющим входное сопротивление более 1 МОм. Значения  $\Delta U_{\text{ВП}}$  наблюдали по визуальной шкале осциллографа примерно через 0,2 с после включения тока. Контрольные измерения осциллографировали на фотобумагу.

Исследованы образцы металлов (медь, алюминий, свинец, цинк, железо и латунь), сульфидов (пирит, халькопирит, пирротин, галенит и сфалерит) и окислов (магнетит и гематит). Электро-

\* Забайкальский комплексный научно-исследовательский институт (г. Чита).

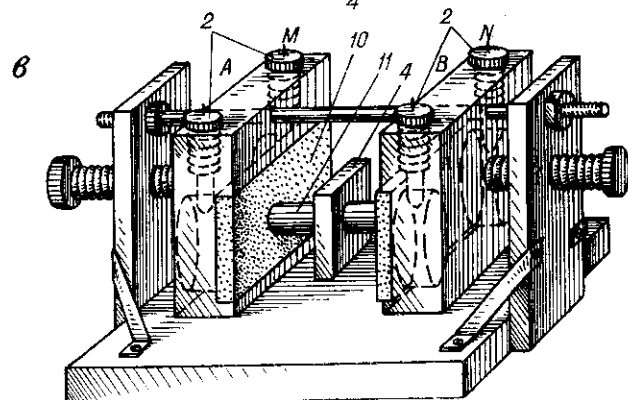
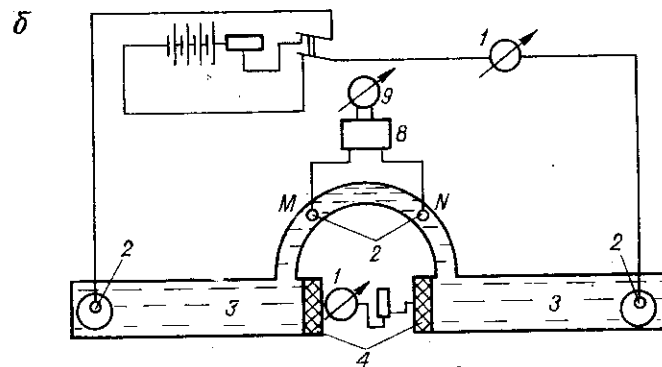
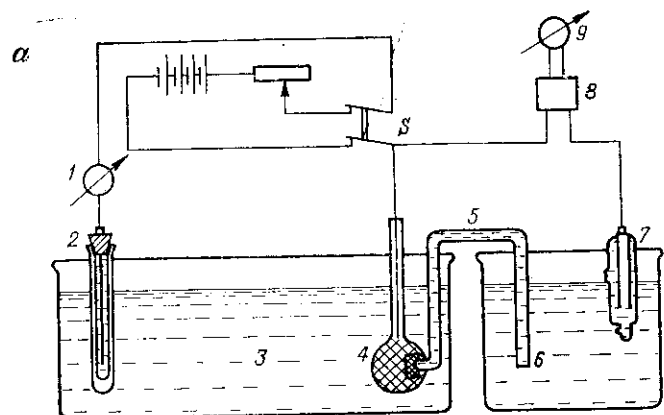


Рис. 6. Лабораторные установки для изучения ВП электродных проводников.  
1 — микроамперметр; 2 — непolarизующийся медный электрод; 3 — электролит; 4 — исследуемый образец; 5 — электролитический ключ (из KCl); 6 — насыщенный раствор KCl; 7 — каломельный электрод; 8 — усилитель постоянного тока; 9 — гальванометр осциллографа; 10 — пористая керамическая перегородка; 11 — агар-агаровый столбик; электроды: A, B — токовые, M, N — измерительные.

литом служила вода из ленинградского водопровода, имеющая примерно следующий состав:

| Катионы                          | мг/л | Анионы                        | мг/л |
|----------------------------------|------|-------------------------------|------|
| Ca <sup>++</sup>                 | 8    | HCO <sub>3</sub> <sup>'</sup> | 27,5 |
| Mg <sup>++</sup>                 | 1,2  | SO <sub>4</sub> <sup>'</sup>  | 4,5  |
| Na <sup>+</sup> + K <sup>+</sup> | 3,8  | Cl <sup>'</sup>               | 3,5  |

Сумма ионов — 48,5 мг/л

В ряде опытов в эту воду вводили сантимолярные добавки серной кислоты, медного купороса, сульфата окиси железа или едкого кали, так что вода имела кислую, нормальную или щелочную реакцию. Перед измерениями ВП поверхность минералов покрывали изоляционным слоем парафина или пластилина, за исключением гладкой площадки, которая служила рабочей поверхностью. В случае металлов рабочей была вся погруженная в раствор поверхность пластины. Плотность поляризующего тока рассчитывали как отношение силы тока к рабочей поверхности. Она изменялась от единиц до тысяч микроампер на 1 см<sup>2</sup>.

При подключении образца к положительному полюсу источника постоянного тока изучали анодные эффекты ВП, при подключении к отрицательному полюсу — катодные. Время зарядки (пропускания тока через образец) при изучении зависимости ВП от плотности тока составляло 2 мин, а при изучении временных характеристик менялось от 5 с до нескольких минут.

Скачок потенциала ВП  $\Delta U_{ВП}$ , равносильный контактной э. д. с. ВП, определяли как разность напряжений до пропускания и после пропускания тока в фиксированный момент зарядки или разрядки. Значение  $\Delta U_{ВП}$  во время зарядки определяли с вычетом омического падения напряжения, регистрируемого при включении тока. Сила тока во время зарядки поддерживалась постоянной.

Вторую установку (рис. 6, б) применяла в 1955 г. Э. А. Мягкова для измерения суммарного эффекта анодной и катодной поляризации в условиях, когда э. д. с. ВП была замкнута на относительно небольшое внешнее сопротивление (20 кОм и ниже) трубки, заполненной тем же раствором, с которым контактировал образец. Образец разрезали на две части, рабочие поверхности которых были обращены к раствору, а к другим присоединяли проволоку, соединяющую обе части образца с микроамперметром. Включая между частями образца различное сопротивление, можно было менять «внутреннее сопротивление» образца. Силу тока ВП в период разрядки регистрировали микроамперметром, включенным между частями образца. Напряжения регистрировались шлейфным осциллографом, гальванометр которого имел собственную частоту 1000 Гц.

В обеих установках (рис. 6, а, б) омическое сопротивление между измерительными электродами было небольшим. Разность потенциалов ВП обычно превышала падение напряжения на оми-

ческом сопротивлении. Поэтому эффекты ВП наблюдали, оставляя осциллограф все время подключенным к измерительным электродам, не меняя чувствительности измерительного канала в момент выключения поляризующего тока.

Третью установку (рис. 6, в) сконструировали в ВИТР для измерения поляризуемости массивных образцов горных пород \* [128]. При изучении ВП электронных проводников можно, используя электроды М и N, измерять суммарную поляризацию анода и катода или, используя в качестве одного из электродов сам образец, порознь измерять напряжение ВП на анодной и катодной поверхности образца. Для стабилизации поляризующего тока в токовую цепь последовательно с образцом включали большое сопротивление (несколько мегаом) и увеличивали напряжение источника поляризующего тока с тем, чтобы это напряжение не менее чем в десятки раз превышало максимальное значение э. д. с. ВП.

С помощью третьей установки Н. А. Пишпарева в 1962—1964 гг. исследовала образцы графита, антрацита, пирита и, для сопоставления ионопроводящего туфа кислых эффузивов [137].

Между блоками электродов и образцов помещали, как показано на рис. 6, в, столбики, изготовленные из густого желе агара-агара, приготовленного на насыщенном растворе медного купороса. Надо сказать, что выдержать химические условия опытов очень трудно. Несмотря на меры предосторожности, относительная погрешность измерений э. д. с. ВП не превышала 5—10% лишь при повторных измерениях, быстро следующих друг за другом, при длительности заряда не более 10—20 мин.

Общим недостатком исследований прошлых лет надо считать относительно узкий интервал времени переходного процесса ВП, изученный в каждом отдельном опыте. Лишь недавно удалось объединить исследования ранней и поздней стадии ВП. Для этого один и тот же образец пирита из полиметаллического золоторудного месторождения сначала был изучен на установке, показанной на рис. 3, с аппаратурой ранней стадии (РС ВП) А. П. Карасевым, затем — с аппаратурой СВП-74 К. Г. Шубниковой в интервале времени от 1 мс до 2 ч. В итоге получена переходная характеристика ВП в интервале времени от 100 мкс до 2 ч, показанная на рис. 7.

Масштаб времени взят логарифмическим. Здесь же приведен график производной  $\Delta U_{ВП}$  по логарифму времени, на котором четко выделяются два максимума на времени 40 мс и 6 с. Третий подъем производной намечается спустя 0,5 ч после включения постоянного поляризующего тока. Таким образом, выделяются 3 разобобщенных во времени процесса ВП, которые можно сопоставить с вышеописанными процессами перенапряжения разряда,

\* Установка подробно описана ниже.

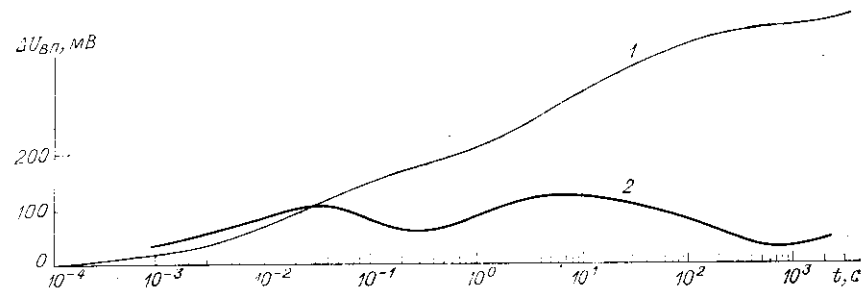


Рис. 7. Временная зависимость ВП образца пирита из полиметаллической руды  
Размер образца  $45 \times 30 \times 10$  мм.  
1 —  $\Delta U_{ВП}$ ; 2 —  $d\Delta U_{ВП}/d \lg T$

адсорбции и диффузии. Время релаксации процессов (временной параметр ВП) определяется по абсциссе максимумов производной ВП по логарифму времени.

В остальных опытах ранняя и поздняя стадии ВП изучены порознь и на разных образцах. Особенности ранней стадии довольно подробно изучены в ЗабНИИ [115]. Установлено, что по мере роста временного параметра  $T_m$  металлы располагаются в той же последовательности, в какой увеличивается стандартный электродный потенциал по водородной шкале  $\Phi_{эл}$  и уменьшается плотность тока обмена  $J_{об}$  (табл. 3). Изучение образцов арсенопирита, халькопирита и галенита из рудных тел различных месторождений показало, что для них характерно значение  $T_m$  в единицы миллисекунд и больше. Этим они заметно отличаются от пирита и арсенопирита из вмещающих пород, временной параметр у которых составляет десятые доли миллисекунды.

А. П. Карасев и О. В. Бумагин [115] аппроксимировали экспериментальные графики временной зависимости экспоненциальной функцией со сложным показателем степени:

$$F(t) = \frac{\eta_k(t)}{\eta_k(20 \text{ мс})} = 1 - \exp\left(-\frac{t}{\tau_0 + Kt^m}\right), \quad (5)$$

ТАБЛИЦА 3

Сопоставление временного параметра ранней стадии ВП  $T_m$  с электрохимическими константами  $\Phi_{эл}$ ,  $J_{об}$  металлов (по А. П. Карасеву и О. В. Бумагину [115])

| Параметр                       | Алюминий | Цинк  | Кобальт | Медь | Серебро | Платина |
|--------------------------------|----------|-------|---------|------|---------|---------|
| $T_m$ , мс                     | 0,3      | 0,4   | 0,7     | 2,2  | 4,0     | 100     |
| $\Phi_{эл}$ , В                | -1,67    | -0,76 | -0,27   | 0,34 | 0,8     | 1,7     |
| $J_{об}$ , мкА/см <sup>2</sup> | —        | 120   | —       | 20   | —       | 6       |

ТАБЛИЦА 4

Коэффициенты экспоненциальной функции  
(по А. П. Карасеву и О. В. Бумагину [115])

| Номер графика<br>на рис. 8 | Коэффициенты  |       |     |
|----------------------------|---------------|-------|-----|
|                            | $\tau_0$ , мс | $K$   | $m$ |
| Для лабораторных условий   |               |       |     |
| 1                          | 0,45          | 1,07  | 0,8 |
| 2                          | 0,45          | 2,46  | 0,7 |
| 3                          | 5             | 3,34  | 0,6 |
| 4                          | 27,5          | 5     | 0,5 |
| 5                          | 77            | 3,56  | 0,5 |
| 6                          | 50            | 18,3  | 0,3 |
| 7                          | 13            | 27,5  | 0,3 |
| Для полевых условий        |               |       |     |
| 8                          | 0,045         | 0,22  | 0,8 |
| 9                          | 0,06          | 0,4   | 0,8 |
| 10                         | 0,06          | 0,15  | 0,7 |
| 11                         | 0,01          | 1,075 | 0,6 |
| 12                         | 1,0           | 2,16  | 0,6 |

где  $t$  — время переходного процесса;  $\tau_0$ ,  $m$  и  $K$  — экспериментально определяемые параметры.

Величину  $\tau_0$  авторы объяснили как постоянную времени зарядки двойного электрического слоя:

$$\tau_0 = BC/(2J_{ог}), \quad (6)$$

где  $B$  — угловой коэффициент уравнения Тафеля;  $C$  — поляризационная емкость.

Параметры  $m$  и  $K$  связаны с псевдоемкостью. При быстрой адсорбции и лимитирующей роли диффузии  $m = 0,5$ :

$$K = \frac{B}{2J_{ог}} \cdot \frac{z^2 F^2}{RT} C_i \sqrt{2D}, \quad (7)$$

где  $z$  — валентность ионов;  $C_i$  — концентрация активных ионов;  $F$  — число Фарадея;  $R$  — газовая постоянная;  $T$  — абсолютная температура;  $D$  — коэффициент диффузии.

На рис. 8 приведены экспериментальные графики временных зависимостей для металлов и минералов. Значения параметров теоретической функции приведены в табл. 4.

Рассмотрим зависимость контактной э. д. с. ВП от плотности тока. Показания ВП снимали через 0,2 с после выключения тока, зарядка длилась 2 мин.

Катодную поляризацию металлов можно разделить на два типа. Первый тип характеризуется резким возрастанием ВП при

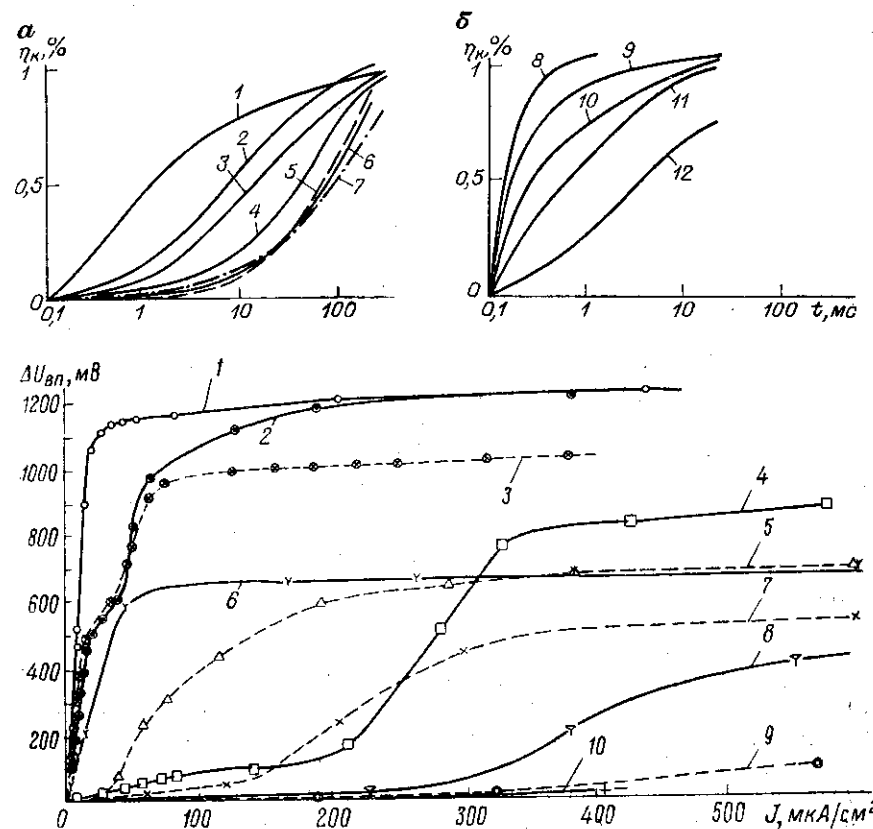


Рис. 8. Экспериментальные переходные характеристики ранней стадии ВП, полученные в лабораторных (а) и полевых (б) условиях (по Карасеву А. П., О. В. Бумагину [115]).

1 — цинк; 2 — пирит из березовых золоторудных месторождений; 3 — медь; 4 — пирит из полиметаллической руды; 5 — платина; 6 — графит; 7 — галенит; 8 — над пиритизированными туфами; 9, 10, 11 — в разных точках профиля над пиритизированными углистыми сланцами; 12 — над графитизированными известняками.

Рис. 9. Катодная поляризация металлов в различных электролитах. 1 — алюминий в водопроводной воде; 2 — медь в водопроводной воде; 3 — латунь в водопроводной воде; 4 — свинец в водопроводной воде; 5 — железо в водопроводной воде; 6 — медь в санимолярном растворе  $H_2SO_4$  (во всех случаях растворитель — водопроводная вода); 7 — железо в санимолярном растворе  $CuSO_4$ ; 8 — медь в санимолярном растворе  $CuSO_4$ ; 9 — свинец в санимолярном растворе  $CuSO_4$ ; 10 — цинк в санимолярном растворе  $CuSO_4$ .

малой плотности тока и последующим выполаживанием графика, когда плотность тока достигает десятков микроампер на  $1 \text{ см}^2$  и более. Такой тип ВП присущ, например, алюминию, меди и латуни, погруженным в водопроводную воду, меди в растворе серной кислоты (рис. 9).

Второй тип характеризуется слабым, иногда незаметным возрастанием ВП при малых плотностях тока и последующим резким

ростом при токе плотностью десятки — сотни микроампер на  $1 \text{ см}^2$ . Он обнаружен у меди, свинца и железа в растворе медного купороса, у железа в водопроводной воде, т. е. в условиях, когда катионы раствора способны выделяться на электроде при малом перенапряжении.

Черты поляризации обоих типов наблюдаются у свинца в водопроводной воде: после небольшой поляризации первого типа э. д. с. ВП резко увеличивается, как только плотность тока превышает  $200 \text{ мкА/см}^2$ . Во всех случаях при некоторой плотности тока наблюдается «насыщение» ВП. У алюминия и меди в водопроводной воде оно составляет около  $1200 \text{ мВ}$ , у других металлов и растворов — несколько сот милливольт. Плотность тока «насыщения» тем меньше, чем выше уровень «насыщения».

Анодная поляризация металлов в рассматриваемых условиях была намного меньше катодной и детально не исследовалась\*.

В отличие от металлов у рудных минералов анодная и катодная поляризации соизмеримы, хотя токовые зависимости различны. На рис. 10 показаны графики для халькопирита в разных растворах, на рис. 11 — для разных минералов в водопроводной воде. У минералов преобладает первый тип ВП: угол наклона графика наибольший при малой плотности тока, когда токовая зависимость близка к линейной.

При высокой плотности тока у минералов, как и у металлов, на токовых зависимостях имеются «ступеньки», которым обычно сопутствует заметное выделение на образцах осадка или газа, являющихся продуктами электролиза. Эти зависимости аналогичны получаемым при полярографическом анализе растворов [71]. Ю. С. Рысс разработал способ КСПК определения минерального состава рудных тел на основе анализа поляризационных кривых в условиях, когда источник тока подключен к телу с помощью скважины [243].

У сфалерита «ступеньки» наблюдаются при малых плотностях тока (единицы микроампер на  $1 \text{ см}^2$ ), но исследованный кристалл сфалерита, как, впрочем, и другие, обладал высоким удельным сопротивлением, так что ток, вероятно, протекал по микротрещинам в кристалле и плотность его значительно превышала вычисленную. Кроме того, судя по изучению шлифа сфалерита под микроскопом, кристалл содержал эмульсионную вкрапленность халькопирита, которая должна была повлиять на значение э. д. с. ВП.

Повторная серия опытов осуществлена в 1965—1966 гг. в ВИТР В. Н. Березовским. Раствор был приготовлен на дистиллированной воде и имел известные компоненты и значение рН. Плотность тока составляла  $4 \text{ мкА/см}^2$ . Э. д. с. ВП отсчитывалась

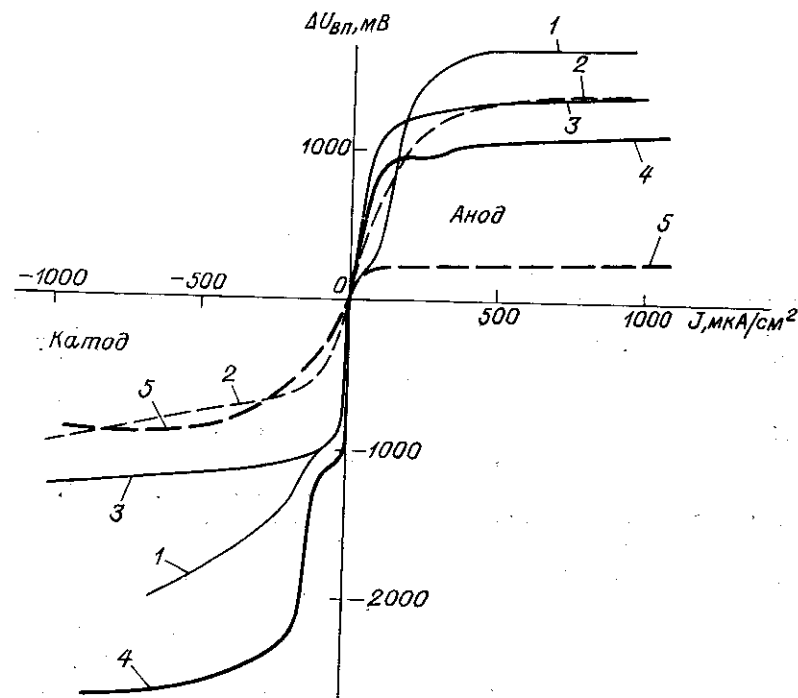
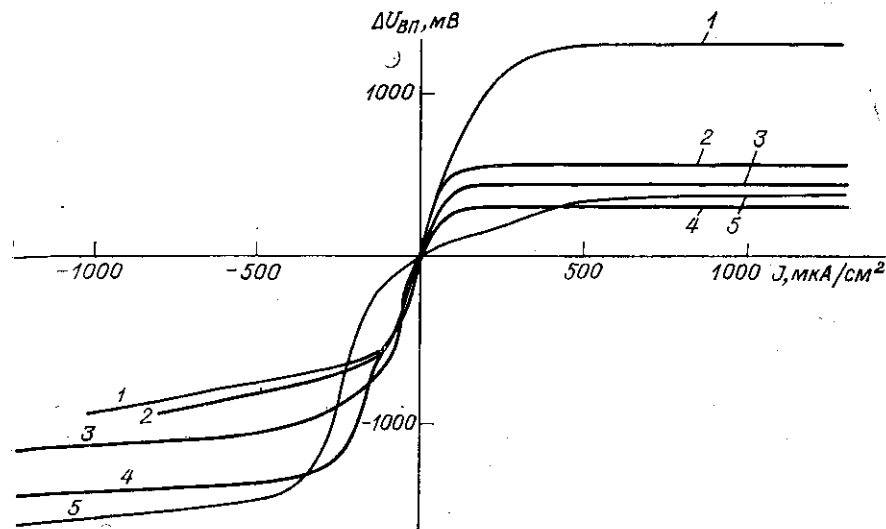


Рис. 10. ВП халькопирита в сантиметовых растворах различных электролитов (растворитель — водопроводная вода).

1 — водопроводная вода; 2 — KOH; 3 —  $\text{Fe}_2(\text{SO}_4)_3$ ; 4 —  $\text{H}_2\text{SO}_4$ ; 5 —  $\text{CuSO}_4$ .

Рис. 11. ВП различных минералов в водопроводной воде.

1 — сфалерит; 2 — пирротин; 3 — халькопирит; 4 — магнетит; 5 — галенит.

\* Недавние опыты показали, что анодная поляризация меди в водопроводной воде развивается позднее, чем катодная. Их время релаксации соответственно единицы и сотни секунд.

ТАБЛИЦА 5  
Поляризация минералов в 0.1 н. растворе  $\text{Na}_2\text{SO}_4$

| Минерал     | $\mathcal{E}$ , мВ |       |
|-------------|--------------------|-------|
|             | Анод               | Катод |
| Пирит       | 66                 | 75    |
| Пирротин    | 4,39               | 4,33  |
| Халькопирит | 64                 | 100   |
| Галенит     | 20,5               | 25,0  |
| Магнетит    | 78                 | 99    |
| Графит      | 159                | 141   |

pH = 7;  $J = 1 \text{ мкА/см}^2$ ;  $t_3 = 1 \text{ мин}$ ;  $t = 0,2 \text{ с}$ .

ТАБЛИЦА 6  
Поляризация минералов в разных растворах

| Раствор                          | pH | $\mathcal{E}$ , мВ |       |         |       |        |       |
|----------------------------------|----|--------------------|-------|---------|-------|--------|-------|
|                                  |    | Пирит              |       | Галенит |       | Графит |       |
|                                  |    | Анод               | Катод | Анод    | Катод | Анод   | Катод |
| 0,01 н. $\text{NaHSO}_4$         | 3  | 62,5               | 74    | 21,0    | 38    | 290    | 250   |
| 0,01 н. $\text{Na}_2\text{SO}_4$ | 7  | 113                | 151   | 24,6    | 58    | 250    | 195   |
| 0,1 н. $\text{Na}_2\text{SO}_4$  | 7  | 66                 | 75    | 20,5    | 25    | 150    | 141   |
| 0,01 н. $\text{Na}_2\text{CO}_3$ | 9  | 32                 | 50    | 56,5    | 64    | 116    | 135   |

$J = 1 \text{ мкА/см}^2$ ;  $t_3 = 1 \text{ мин}$ ;  $t = 0,2 \text{ с}$ .

во время зарядки через 1 мин после включения тока. Результаты опытов приведены в табл. 5 и 6. Характерно, что при pH = 7 (раствор  $\text{Na}_2\text{SO}_4$ ) у сульфидов и магнетита катодная поляризация превышает анодную, а у графита, наоборот, анодная — катодную. Для всех минералов увеличение концентрации раствора  $\text{Na}_2\text{SO}_4$  сопровождалось уменьшением ВП. Зависимость ВП от pH, равнявшейся 3, 7 или 9, оказалась менее важной и маскируемой влиянием состава и концентрации электролита.

Двум типам токовых зависимостей ВП соответствуют разные временные характеристики. На рис. 12 приведены выкопировки из двух осциллограмм — для катодной поляризации магнетита в водопроводной воде и меди в растворе медного купороса. В момент включения тока  $t_1$  происходит скачок напряжения, соответствующий омическому падению напряжения между измерительными электродами. Затем наблюдается рост ВП, который в рассматриваемых случаях сходен с токовыми зависимостями. После выключения тока (момент  $t_2$ ) обычно наблюдается монотонный спад ВП.

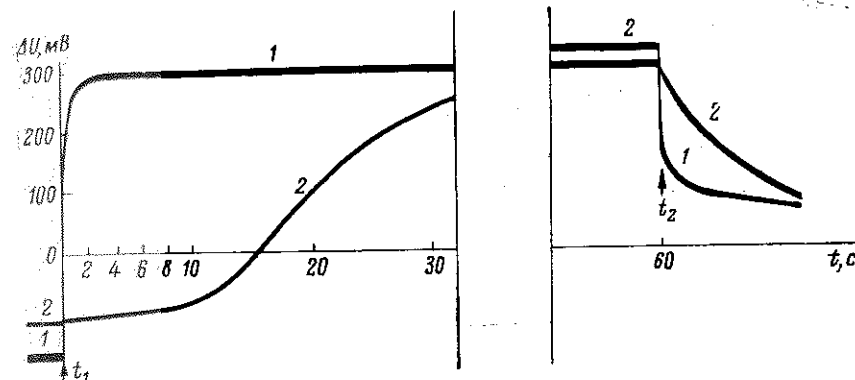


Рис. 12. Осциллограммы разности потенциалов между измерительными электродами.

Катодная поляризация: 1 — магнетита в водопроводной воде ( $J = 4,5 \text{ мкА/см}^2$ ), 2 — меди в растворе  $\text{CuSO}_4$  ( $J = 670 \text{ мкА/см}^2$ ).

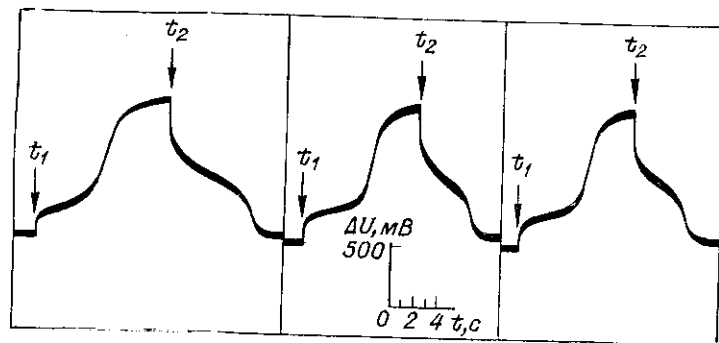
Но иногда полярографические «ступеньки» при высокой плотности тока наблюдаются на кривых зарядки и разрядки. Для примера, на рис. 13 даны три последовательные осциллограммы для магнетита. Количество «ступенек» в периоды зарядки и разрядки одинаково и равно их числу на участке токовой зависимости, соответствующем примененной плотности тока. При повторных измерениях «ступеньки» хорошо воспроизводятся.

Осциллограммы на рис. 13 получены при относительно короткой зарядке (10 с). С увеличением длительности зарядки и чрезмерной плотности тока «ступеньки» становятся менее четкими. На рис. 14 показаны кривые спада ВП для сфалерита \* при зарядке 5, 30 и 120 с. На первых двух кривых видны «ступеньки», расположенные на одном и том же уровне  $\Delta U_{\text{ВП}}$ . С увеличением длительности зарядки кривая спада ВП как бы растягивается вдоль оси абсцисс и «ступеньки» становятся невидными.

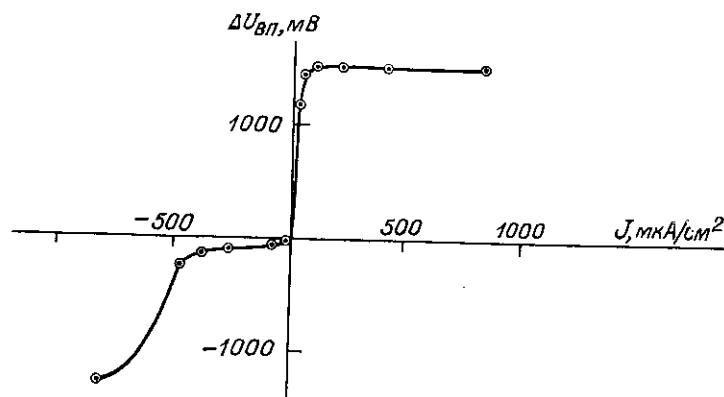
Сходство токовых и временных характеристик ВП можно объяснить единством происходящих электрохимических реакций. Если при увеличении плотности тока первыми на электронном проводнике осаждаются ионы с наименьшим потенциалом выделения, то они же первыми осадут и при высокой плотности тока, достаточной для осаждения других ионов. После выключения тока ионы с поверхности электронного проводника возвращаются в раствор в порядке, обратном тому, что был при зарядке. Но если плотность тока и длительность зарядки были очень большими, возможен одновременный ход нескольких процессов осаждения и растворения ионов, тогда «ступеньки» становятся нечеткими.

\* Как было указано выше, образец сфалерита имел включения халькопирита, и эффективная плотность тока, вероятно, была значительно выше вычисленной.

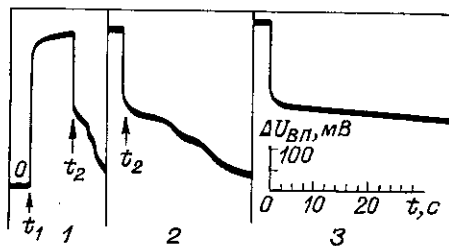
а



б



а



б

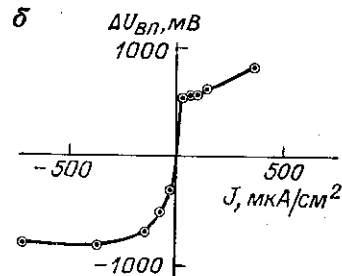


Рис. 13. Осциллограммы катодной поляризации магнетита в сантиметлярном растворе  $H_2SO_4$  при  $J = 800 \text{ мА/см}^2$  (а) и зависимость  $\Delta U_{вп}$  от  $J$  для магнетита (б) в том же электролите ( $t_3 = 2 \text{ мин}$ ,  $t = 0,2 \text{ с}$ ).

Рис. 14. Осциллограммы катодной поляризации сфалерита в сантиметлярном растворе  $Fe_2(SO_4)_3$  при разной длительности зарядки,  $J = 8,6 \text{ мА/см}^2$  (а) ( $t_3$ , с: 1 — 120, 2 — 30, 3 — 5) и зависимость  $\Delta U_{вп}$  от  $J$  для сфалерита (б) в том же электролите ( $t_3 = 2 \text{ мин}$ ,  $t = 0,2 \text{ с}$ ).

ТАБЛИЦА 7

Суммарная поляризация анода и катода образцов

| Образец  | $\mathcal{E}$ , мВ, при $J = 1 \text{ мА/см}^2$ | $\kappa$ , Ом·м² |
|----------|-------------------------------------------------|------------------|
| Медь     | 65                                              | 6,5              |
| Латунь   | 45                                              | 4,5              |
| Железо   | 30                                              | 3,0              |
| Свинец   | 10                                              | 1,0              |
| Алюминий | 110                                             | 11,0             |
| Цинк     | 20                                              | 2,0              |
| Пирит    | 50                                              | 5,0              |
| Галенит  | 95                                              | 9,5              |
| Пирротин | 56                                              | 5,6              |

Выбирая условия опытов, можно осуществить исследования химического состава минералов. Сульфиды железа изучал И. Такубо [416].

В опытах с установкой, показанной на рис. 6, б, в большей мере, чем с другими, моделировались условия полевых работ. Э. д. с. ВП вычисляли по результатам измерений  $\Delta U_{вп}$  между измерительными электродами, тока ВП внутри образца и омического сопротивления всех участков цепи. Плотность тока не превышала единиц микроампер на  $1 \text{ см}^2$ , и зависимость от нее ВП была линейной. Электролитом служила водопроводная вода с небольшой добавкой силикатного клея, которая от опыта к опыту увеличивала э. д. с. ВП и ее устойчивость.

В табл. 7 приведены значения э. д. с. ВП и коэффициента пропорциональности между ней и плотностью тока  $\kappa = -\mathcal{E}/J$ , выраженного в системе СИ.

При увеличении концентрации клея э. д. с. ВП меди уменьшалась обратно пропорционально удельному сопротивлению электролита  $\rho_s$ , так что коэффициент  $\lambda = \kappa/\rho_s$  менялся мало, хотя  $\rho_s$  и  $\kappa$  в ходе опыта изменились на порядок (табл. 8).

ТАБЛИЦА 8

Зависимость поляризации меди от удельного сопротивления электролита

| $\rho_s$ , Ом·м | $\mathcal{E}$ , мВ, при $J = 5 \text{ мА/см}^2$ | $\kappa$ , Ом·м² | $E_s$ , В/м | $\lambda$ , м |
|-----------------|-------------------------------------------------|------------------|-------------|---------------|
| 21,0            | 940                                             | 18,8             | 1,05        | 0,90          |
| 11,0            | 515                                             | 10,3             | 0,55        | 0,94          |
| 5,8             | 348                                             | 6,96             | 0,29        | 1,20          |
| 3,7             | 240                                             | 4,80             | 0,18        | 1,30          |
| 2,4             | 131                                             | 2,62             | 0,12        | 1,09          |

Изменения удельного сопротивления электролита пропорционально уменьшали сопротивление разрядной цепи э. д. с. ВП, но к заметным изменениям скорости спада ВП не привели. Увеличение внутреннего сопротивления образца путем включения между анодной и катодной частями образца проволоочного сопротивления от 1 до 10 кОм также не повлияло на спад ВП.

Закон поведения ВП при малых плотностях тока имеет важнейшее значение для оценки возможностей метода ВП в полевых условиях. Поэтому линейность ВП по отношению к току проверяли многократно. На установке, показанной на рис. 6, в, такие опыты проведены с образцами графита, используемого в качестве электродов в электролитических ваннах, графитового сланца из Центрального Казахстана, антрацита, пирита и ионопроводящего туфа. Плотность тока не превышала 30 мкА/см<sup>2</sup>. Линейная зависимость наблюдалась у всех образцов, за исключением графита. У графита зависимость от плотности тока аппроксимирована формулой

$$\mathcal{E} = \Delta U_{\text{ВП}} = -303 \ln(1 + 2,5J),$$

где  $\Delta U_{\text{ВП}}$ , мВ;  $J$ , мкА/см<sup>2</sup>.

Знак минус в правой части формулы означает, что ВП создает ток, противоположный поляризующему. Зависимость становится линейной, если  $J < 0,4$  мкА/см<sup>2</sup>, тогда  $\kappa$  не зависит от тока и в рассматриваемых условиях 2-минутной зарядки равна 75,5 Ом·м<sup>2</sup>. В условиях 10-секундной зарядки:

|                   | $\kappa$ , Ом·м <sup>2</sup> |
|-------------------|------------------------------|
| Графит            | 12,5                         |
| Графитовый сланец | 0,38                         |
| Пирит             | 3,8                          |
| Туф               | 0,013                        |

В условиях линейной токовой зависимости форма кривой спада строго выдерживается, если только сохраняется длительность зарядки [137]. При большой плотности тока, когда процессы ВП нелинейны, спад ВП замедляется.

Раннюю стадию ВП сульфидов (начиная с 2—10 мс) изучали также во МГРИ [290, 291]. Была подтверждена линейность ВП при малой плотности тока. Отмечено, что диапазон линейности для катодной поляризации больше, чем для анодной, катодная поляризация в большей мере зависит от концентрации электролита. Опыты с пиритом, халькопиритом и галенитом, помещенными в смесь электролитов NaCl, HCl и NaOH, показали, что поляризация сохраняется примерно постоянной при pH = 3 ÷ 10, но падает при pH = 1,7 и возрастает при pH = 11,4.

Изучение природы вызванной поляризации пирита и пирротина выполнили сотрудники Института геофизики УНЦ АН СССР и Свердловского горного института [93, 94, 95, 158]. Они установили, что в электрохимических реакциях сульфидов железа вид-

ную роль играет дисульфидный ион S<sub>2</sub><sup>2-</sup>, который на катоде восстанавливается до HS<sup>-</sup>, на аноде окисляется до S<sup>0</sup> и SO<sub>4</sub><sup>2-</sup>. По их данным  $\kappa$  для пирита не зависит от концентрации «индифферентного» электролита Na<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>, если pH остается постоянной. При изменении pH, достигаемом за счет соотношения составных частей смеси H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>, Na<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> и NaOH, в условиях постоянного удельного сопротивления раствора (50 Ом·см) коэффициент  $\kappa$  меняется:

| pH                            | 1   | 3   | 5,2 | 9   | 11  | 12,8 |
|-------------------------------|-----|-----|-----|-----|-----|------|
| $\kappa$ , Ом·см <sup>2</sup> |     |     |     |     |     |      |
| на катоде                     | 2,5 | 2,8 | 5,4 | 6,5 | 3,7 | 0,7  |
| на аноде                      | 3,5 | 1,7 | 3,6 | 4,0 | 4,0 | 0,9  |

В этих опытах время зарядки составляло 2 мин,  $\Delta U_{\text{ВП}}$  отсчитывалась через 1 с после выключения тока.

В. В. Жаворонкова [92, 93] выяснила, что преобладающим в ВП сульфидов является механизм химической поляризации, под которым понимается процесс образования на поверхности электронного проводника под действием тока новых веществ. Выше отмечены реакции дисульфидного иона. Входящее в состав сульфидов железо, например при катодной поляризации пирротина, восстанавливается до элементарного, а в дальнейшем образуются гидроокислы железа. Последние образуются и при анодной поляризации пирита. При анодной и катодной поляризации галенита образуется свинец. Кроме того, определенное значение могут иметь процессы окисления — восстановления двух- и трехвалентного железа, содержащегося в электролите, а также реакция выделения на катоде водорода. Относительная роль того или иного конкретного процесса зависит от состава электронного проводника и электролита, от концентрации и значения pH раствора.

## ВЫВОДЫ

1. Все экспериментальные результаты дают несомненное основание отождествить ВП электронных проводников с известной в электрохимии электролитической поляризацией.

Прохождение электрического тока через границу электронного и ионного проводников немислимо без эффектов электролиза и изменений двойного электрического слоя, существующего на этой границе и определяющего значение электродного потенциала. Двойной слой возникает в результате динамического равновесия между ионами раствора и твердого вещества. «Нарушение равновесия, связанное с прохождением тока, называют электролитической поляризацией» [71, с. 561]. «Электролитическая поляризация является следствием медленности одного или нескольких процессов, происходящих на электроде во время разряда или образования ионов, причем тип поляризации существенно зависит от природы этого процесса» [71, с. 563].

Мнение об электрохимической природе ВП выдвинуто К. Шлюмберже «на заре» метода ВП и поддерживается подавляющим большинством геофизиков [85, 221, 230, 330, 337, 388].

2. При низких плотностях поляризующего тока можно выделить два типа токовых зависимостей э. д. с. ВП, соответствующих, с одной стороны, перенапряжениям разряда и адсорбции (активационной и химической поляризации), с другой — перенапряжению диффузии (концентрационной поляризации).

Первый тип характеризуется постепенным уменьшением наклона кривой токовой зависимости с ростом плотности тока и может быть описан уравнением

$$\mathcal{E} = -a \ln(1 + J/J_{об}), \quad (8)$$

где  $\mathcal{E}$  — э. д. с. ВП, соответствующая фиксированной длительности зарядки и разрядки;  $J$  — плотность поляризующего тока;  $J_{об}$  — плотность тока обмена, зависящая от состава и концентрации электролита и состава электронного проводника [71, 118].

Второй тип характеризуется увеличением наклона кривой с ростом плотности тока и описывается уравнением

$$\mathcal{E} = +a \ln(1 - J/J_{пр}), \quad (9)$$

где  $J_{пр}$  — предельная плотность тока для заданного состава раствора (она возрастает с увеличением концентрации раствора).

В обоих уравнениях постоянная  $a$  для установившегося процесса ВП

$$a = RT/(zF).$$

Для одновалентных ионов при комнатной температуре  $a \approx 25$  мВ.

Уравнения (8)–(9) в самом простом виде отражают поляризацию металлов и сульфидов, когда при малой плотности тока происходит обмен ионами между электронным проводником и электролитом. При этом время пропускания тока должно быть достаточным для стабилизации электрохимических реакций; время разрядки предполагается равным нулю. На графите в условиях описанных опытов ионы раствора практически не разряжались. При достаточно долгом пропускании тока на графите можно было добиться поляризации 1,2 В и реакции разложения воды.

В условиях многокомпонентного электролита одновременно могут проявляться оба типа поляризации, причем их соотношение зависит от длительности зарядки и плотности тока. В итоге возможны ступенеобразные токовые и временные зависимости ВП.

3. При плотности тока значительно меньше  $J_{об}$  и  $J_{пр}$ , э. д. с. ВП пропорциональна плотности тока:

$$\mathcal{E} = -\kappa J, \quad (10)$$

где  $\kappa = a/J_{об}$  для первого типа;  $\kappa = a/J_{пр}$  для второго типа поляризации.

Коэффициент пропорциональности  $\kappa$  тем больше, чем труднее происходит электролиз для состава электронного проводника и электролита. Для рудных минералов  $\kappa$  в среднем имеет значение единиц ом-метров квадратных. Рост концентрации ионов, разряжающихся на электронном проводнике, приводит к уменьшению  $\kappa$ .

Увеличение концентрации электролита сопровождается уменьшением его удельного сопротивления, поэтому во многих случаях большей устойчивостью, чем  $\kappa$ , обладает коэффициент пропорциональности  $\lambda$  между э. д. с. ВП и напряженностью электрического поля в электролите  $E_2$ :

$$\mathcal{E} = \lambda E_2; \quad \lambda = \kappa/\rho_2. \quad (11)$$

4. При небольшой плотности тока форма кривых спада ВП практически не зависит от тока и удельного сопротивления электролита. При большой плотности тока увеличение удельного сопротивления приводит к замедлению спада ВП.

5. Последовательное чередование на пути электрического тока электронных и ионных проводников сопровождается ростом суммарной э. д. с. ВП, примерно пропорциональным числу границ. Это создает предпосылку большого эффекта ВП у вкрапленных руд.

## ВП ИОНОПРОВОДЯЩИХ ПОРОД

Электрические процессы, происходящие на одиночной границе изолятора — твердого вещества и электролита, изучать очень трудно. Все опыты по ВП сред, состоящих из изолятора и электролита, проводили на образцах, размер которых значительно превышал размер отдельных «зерен» изолятора. Таким образом, приобретались сведения об объемной поляризации сред, в отличие от описанной выше поверхностной поляризации электронных проводников [85, 166, 176, 189, 205, 388].

Методика опытов с рыхлыми горными породами проще, чем с массивными, и вместе с тем позволяет осуществить заданный состав твердой и жидкой фаз. Большая часть опытов, проведенных в ВИТР в 1954—1956 гг. Л. С. Хлопониной, выполнена с кварцевым песком [53, 122, 123]. С той же аппаратурой в ВИТР провел опыты в 1955—1956 гг. И. И. Рокитянский [237]. Позднее на кафедре коллоидной химии ЛГУ выполнены экспериментальные и теоретические исследования вызванной поляризации кварцевого порошка и других веществ [289]. Одновременно в ВИТР и ряде производственных организаций проведены лабораторные и полевые исследования вызванной поляризации массивных горных пород [53, 128, 242, 303].

### Поляризация кварцевого песка

На первой стадии опытов исследуемый песок помещали в большую кварцевую трубку (длина ~200, диаметр ~10 см), на концах

которой находились токовые электроды  $A$  и  $B$ , а в середине — измерительные  $M$  и  $N$  (рис. 15, а). Но вскоре убедились, что измеряемое значение  $\Delta U_{ВП}$  зависит только от свойств того объема песка, который находится между измерительными электродами; в дальнейшем исследуемую порцию песка с заданной влажностью и составом электролита помещали в небольшую стеклянную трубку, которую вставляли между измерительными электродами и отделяли от остального песка целлофановой пленкой (рис. 15, б). Измерительные электроды были неполяризующимися — медными в опытах с раствором  $\text{CuSO}_4$  и каломельными в опытах с  $\text{KCl}$ . Для проверки влияния электродов проведены опыты с установкой, в которой токовые и измерительные электроды отделены от песка и соединены с ним лишь через электролитические ключи (рис. 15, в).

Значение  $\Delta U_{ВП}$  измеряли с помощью высокочастотного шлейфного осциллографа, снабженного усилителем постоянного тока. Тем же осциллографом на киноленту записывали силу поляризующего тока. Разность потенциалов между измерительными электродами во время пропускания тока  $\Delta U_{пр}$  измеряли ламповым вольтметром. Переключение тока и включение осциллографа осуществляли пакетным переключателем со временем срабатывания около 10 мс.

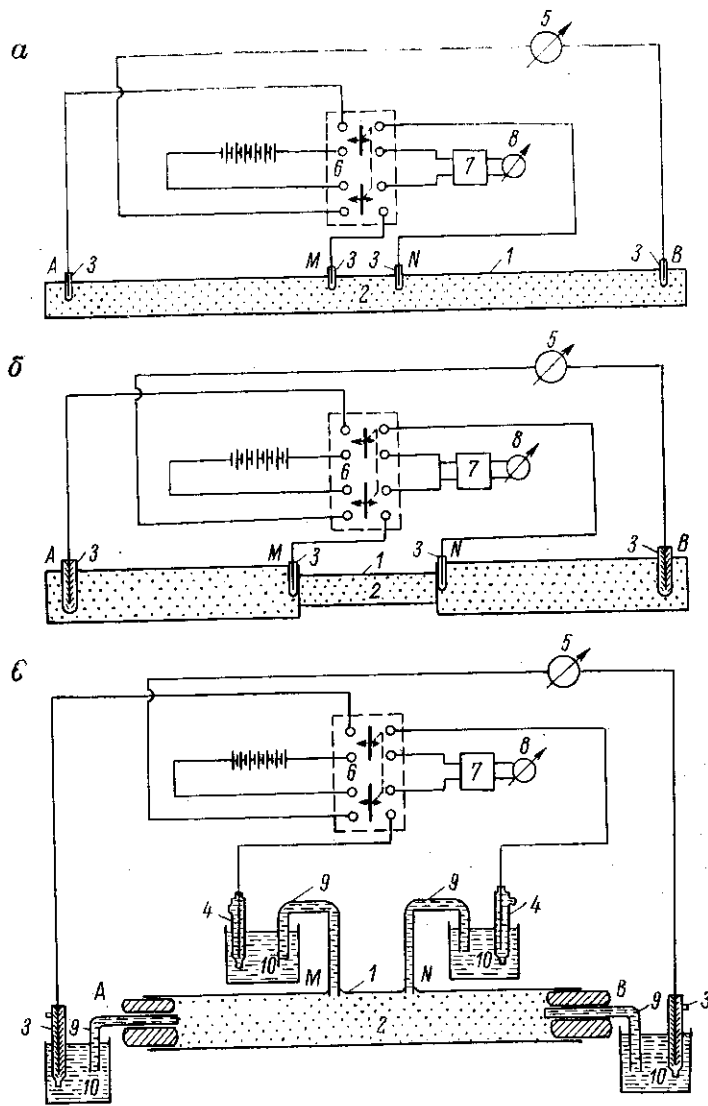


Рис. 15. Схемы лабораторных установок для изучения ВП.

а — применявшаяся при исследовании не разделенного на фракции песка, смоченного раствором медного купороса ( $AB = 100$  см;  $MN = 20$  см; поперечное сечение трубы  $78$  см<sup>2</sup>); б — применявшаяся при исследовании разделенного на фракции песка, смоченного раствором медного купороса, и песка с вкрапленностью электропроводящих частиц ( $AB = 60$  см;  $MN = 20$  см; сечение трубки между измерительными электродами  $19$  см<sup>2</sup>); в — применявшаяся при исследовании разделенного на фракции песка, смоченного раствором хлористого калия ( $AB = 20$  см;  $MN = 5$  см; поперечное сечение трубки  $4,9$  см<sup>2</sup>).

1 — стеклянная трубка; 2 — исследуемый образец; 3 — неполяризуемый медный электрод; 4 — каломельный электрод; 5 — микроамперметр; 6 — пакетный переключатель; 7 — усилитель постоянного тока; 8 — гальванометр осциллографа; 9 — электролитический ключ; 10 — раствор хлористого калия.

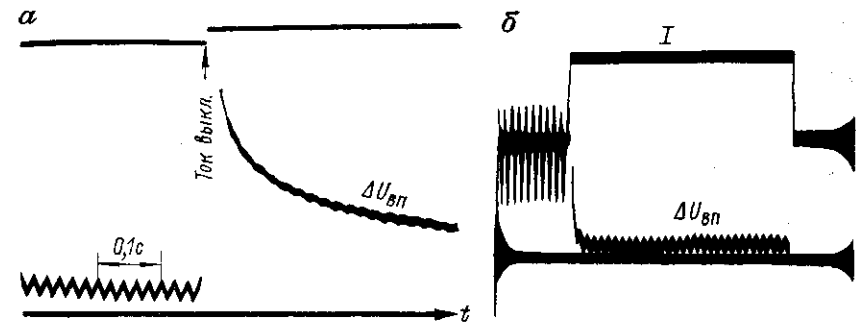


Рис. 16. Осциллограммы  $\Delta U_{ВП}$  в случаях, когда между электродами находится влажный песок (а) и вода (б).

Оценка влияния аппаратных помех выполнена на цепи, составленной из омических сопротивлений, имитирующих образцы и электроды. Помехи проверяли на рабочей установке, когда вместо песка в трубку помещали воду, не создающую эффекта ВП. В итоге установлено, что искажения записи напряжения прекращаются менее чем через  $0,1$  с (рис. 16). В качестве меток времени служила наводка на измерительный канал от сети переменного тока, дающая синусоиду с частотой  $50$  Гц.

Обработка осциллограмм заключалась в определении разности потенциалов ВП через  $0,25$  с после выключения тока по отношению к записи до включения тока. Затем вычисляли поляризуемость, %,

$$\eta = (\Delta U_{ВП} / \Delta U_{пр}) \cdot 100.$$

Все опыты проведены при нескольких значениях тока. Кроме того, сняты токовые зависимости ВП в диапазоне плотностей тока от  $0,5$  до  $250$  мкА/см<sup>2</sup> поперечного сечения трубки с исследуемым образцом. Во всех случаях в пределах  $5$ — $10\%$ -ной погрешности  $\Delta U_{ВП}$  и  $\Delta U_{пр}$  пропорциональны току, а поляризуемость  $\eta$  не зависит от него.

С увеличением длительности зарядки  $\Delta U_{ВП}$  и  $\eta$  достигали значения, близкого к предельному, примерно через  $2$  мин (рис. 17). Столько же времени длилась практически полная разрядка ВП. Приводимые ниже значения поляризуемости соответствуют зарядке  $2$  мин и разрядке  $0,25$  с.

Зависимость от влажности. За параметр, характеризующий влажность песка  $W$ , принималось отношение веса воды и сухого песка. Вычисления объемной влажности были менее точными из-за изменений коэффициента упаковки частиц песка, учесть которые трудно. Вес воды определен как разность между весом песка влажного  $P_1$  и сухого после его прокаливании  $P_2$ :

$$W = (P_1 - P_2) / P_1.$$

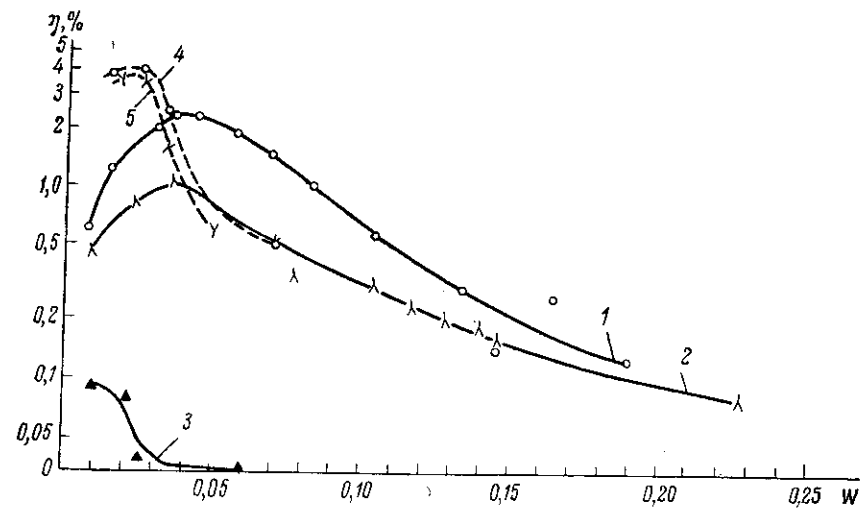
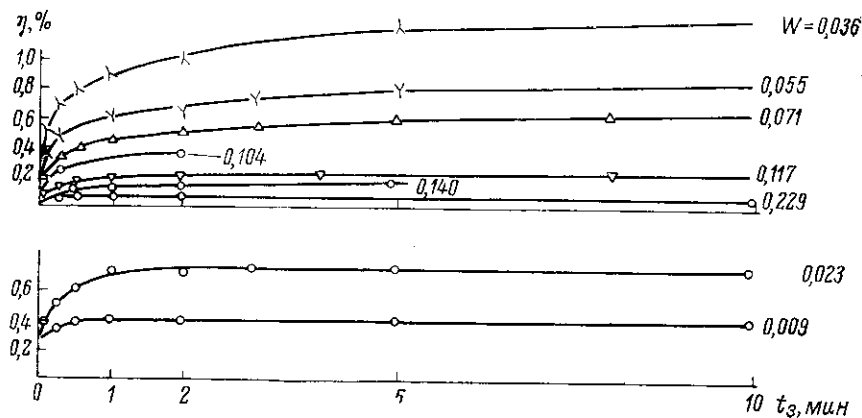


Рис. 17. Зависимость поляризуемости от времени зарядки для кварцевого песка, смоченного раствором медного купороса, при разной влажности.

Рис. 18. Зависимость поляризуемости от влажности для не разделенного на фракции кварцевого песка, смоченного раствором  $\text{CuSO}_4$  (сплошные линии), и песка фракции 100 меш, смоченного раствором  $\text{KCl}$  (штриховые линии).

$t_3 = 2$  мин;  $t = 0,25$  с.  
 $\text{CuSO}_4$ , н.: 1 — 0,001, 2 — 0,01, 3 — 0,1;  $\text{KCl}$ , н.: 4 — 0,001, 5 — 0,01.

Как видно на рис. 18, влагонасыщенный песок характеризуется невысокой поляризуемостью, составляющей десятки доли процента и ниже. С уменьшением влажности возрастает  $\eta$  и достигает максимального значения до 4% при  $W = 0,02 \div 0,05$ ; при меньших влажностях значение  $\eta$  падает. При  $W = 0$  поляризуемость, должно быть, отсутствует, хотя экспериментально это показать трудно в силу невозможности измерений с имевшейся аппаратурой в условиях огромного сопротивления сухого кварца.

ТАБЛИЦА 9  
 Зависимость поляризуемости кварцевого песка  
 от концентрации раствора  $\text{KCl}$

| Концентрация $\text{KCl}$ , н. | $\eta$ , % | $\rho$ , Ом·м |
|--------------------------------|------------|---------------|
| 0,001                          | 3,9        | 1120          |
| 0,01                           | 3,6        | 800           |
| 0,1                            | 2,5        | 380           |
| 1                              | 0,1        | 200           |

Песок фракции 100 меш;  $W = 0,03$ ;  $t_3 = 2$  мин;  
 $t = 0,25$  с.

Максимум зависимости  $\eta$  от  $W$  смещается в сторону меньших влажностей с увеличением концентрации раствора и с уменьшением размера зерен песка. При более однородном размере зерен максимум выражен резче, чем в условиях смеси фракции.

**Зависимость от состава раствора.** При одинаковой влажности поляризуемость резко падает с увеличением концентрации раствора. Для децинормальных растворов  $\text{CuSO}_4$  и  $\text{KCl}$  поляризуемость на порядок ниже, чем для санти- и миллинормальных растворов. В сильно разбавленных растворах поляризуемость становится относительно высокой и устойчивой (табл. 9). Американский геофизик Д. Блейл [338] пытался измерить ВП в песке, насыщенном концентрированным раствором  $\text{KCl}$ , и, не обнаружив ВП, ошибочно сделал вывод, что ионепроводящие горные породы вообще не поляризуются.

И. И. Рокитянский [237] изучил роль химического состава раствора при полном влагонасыщении песка. Было опробовано более 20 электролитов: сульфаты, нитраты и хлориды ряда металлов с валентностью от 1 до 3, а также некоторые кислоты. Концентрация раствора в основном составляла  $2 \cdot 10^{-5}$  н. Установлено, что на поляризуемость влияет не столько химический состав влаги, сколько ее удельное сопротивление и  $\zeta$ -потенциал\*.

Значение  $\zeta$ -потенциала, найденное на основе измерений потенциалов фильтрации, для солей с двухвалентным и особенно с одновалентными катионами при изменении концентрации электролита и соответственном изменении сопротивления песка менялось относительно мало; оно было отрицательным и составляло 70—100 мВ. В этих условиях поляризуемость была примерно пропорциональной удельному сопротивлению песка: при изменении от 1500 до 10 000 Ом·м поляризуемость возросла от 0,03 до 0,6%.

\* В теории электрокинетических явлений  $\zeta$ -потенциалом называется соответствующая подвижной диффузной части двойного слоя разность потенциалов между закрепленной адсорбционной частью внешней обкладки двойного слоя и свободным раствором.

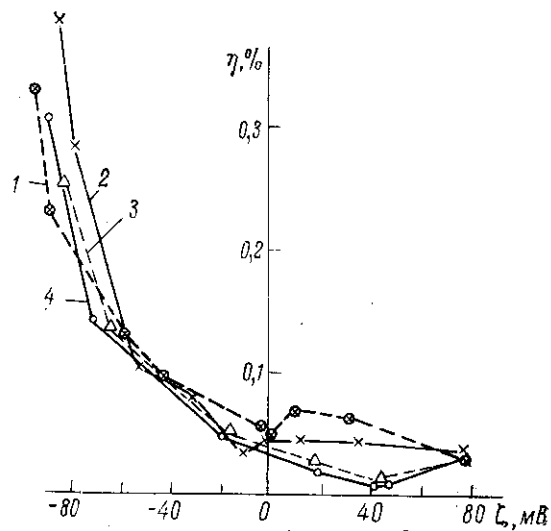


Рис. 19. Зависимость поляризуемости кварцевого песка от электрокинетического потенциала при различном диаметре зерен [237].

$\rho = 1340 \text{ Ом} \cdot \text{м}$ ; 1, 2 —  $\text{NaNO}_3$ ; 3, 4 —  $\text{NaCl}$ ;  $d$ , мм: 1, 3 —  $0,3 \div 45$ , 2, 4 —  $0,15 \div 0,21$ .

Присутствие в растворе трехвалентных катионов алюминия, железа и хрома привело к уменьшению поляризуемости в несколько раз по сравнению с одновалентными катионами. Но одновременно упало и абсолютное значение  $\zeta$ -потенциала. В специальной серии опытов  $\zeta$ -потенциал менялся путем введения в раствор четырехвалентных катионов тория [использовали соль  $\text{Th}(\text{NO}_3)_4$ ]. При изменении концентрации соли тория от 0 до  $4 \times 10^{-5}$  н.  $\zeta$ -потенциал изменился от  $-90$  до  $80$  мВ. Удельное сопротивление песка поддерживали постоянным путем введения в раствор слабо влияющих на  $\zeta$ -потенциал добавок  $\text{NaNO}_3$  или  $\text{HCl}$ ; оно составляло около  $1340 \text{ Ом} \cdot \text{м}$ . В этих условиях поляризуемость резко упала от  $0,3$  до  $0,05\%$ , причем поляризуемость низка не только при нулевом, но и при положительном  $\zeta$ -потенциале (рис. 19). Причину асимметричной зависимости поляризуемости от  $\zeta$ -потенциала выяснить не удалось. По мнению И. И. Рокитянского, это, по-видимому, обусловлено сложным взаимодействием зарядов в адсорбционной и диффузной частях двойного электрического слоя.

**Зависимость от удельного сопротивления песка.** В опытах И. И. Рокитянского [237] поляризуемость влагонасыщенного песка менялась прямо пропорционально удельному сопротивлению, изменявшемуся за счет концентрации электролита. Аналогичные результаты еще раньше получены А. С. Семеновым [257] и М. Г. Латышовой [174], которые измеряли средние значения ВП в паузах между импульсами тока, создаваемыми пульсатором.

В наших опытах уменьшение влажности привело к непрерывному возрастанию удельного сопротивления песка, но при малых  $W$  степень роста  $\rho$  оказалась меньше, чем при больших: при

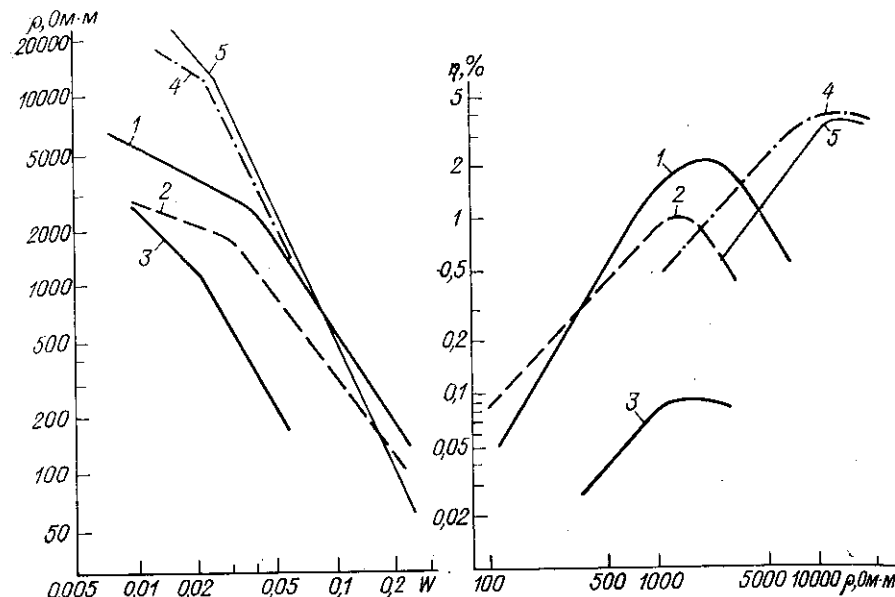


Рис. 20. Зависимость удельного сопротивления от влажности для не разделенного на фракции кварцевого песка, смоченного раствором  $\text{CuSO}_4$  (сплошные линии), и песка фракции 100 меш, смоченного раствором  $\text{KCl}$  (штриховые линии).

Обозначения см. на рис. 18.

Рис. 21. Зависимость поляризуемости кварцевого песка от удельного сопротивления, изменяемого за счет влажности.

Обозначения см. на рис. 18.

влажности  $0,02—0,05$  на кривых зависимости  $\rho$  от  $W$ , построенных в двойном логарифмическом масштабе, наблюдается «излом» (рис. 20). Можно предположить, что это обусловлено большей электропроводностью тонкого слоя раствора на границе с песчинками по сравнению с остальным раствором.

На зависимости поляризуемости от удельного сопротивления песка наблюдается максимум, соответствующий все той же влажности  $0,02—0,05$ . При низком удельном сопротивлении, обусловленном большой влажностью песка, зависимость  $\eta$  от  $\rho$  близка к линейной. Дальнейший рост удельного сопротивления сопровождается уменьшением поляризуемости (рис. 21).

**Зависимость от размера зерен и проницаемости песка.** И. И. Рокитянский [237] показал, что зависимость поляризуемости от радиуса пор и соответственно от проницаемости песка сходна с зависимостью от влажности. Максимум поляризуемости наблюдается при радиусе пор в  $8—10$  мкм. Таков же и порядок толщины пленки влаги, окружающей песчинки при влажности  $0,02—0,05$ . В наших опытах зависимость  $\eta$  от размера зерен тоже представлена в виде кривой с максимумом. Такой же результат получен А. Ф. Постельниковым [227], Д. А. Фридрихсбергом

и М. П. Сидоровой [289]. Последние исследовали порошок кварца, насыщенный  $2 \cdot 10^{-4}$  н. KCl. Диаметр зерен менялся от 15 до 270 мкм. Максимум поляризуемости (0,12%) соответствовал диаметру зерен 100—150 мкм.

**Особенности временных характеристик.** По данным И. И. Рокитянского [237], в случае электролитов, содержащих двухвалентные катионы, скорость спада ВП несколько больше, чем при одновалентных катионах. Зависимость скорости спада от удельного сопротивления песка, так же как и от  $\xi$ -потенциала, не обнаружена. Вместе с тем значительны изменения скорости спада в зависимости от размера песчинок. И. И. Рокитянский привел в своей статье такие данные, соответствующие зарядке 2 мин:

|                                                   |           |          |          |
|---------------------------------------------------|-----------|----------|----------|
| Диаметр песчинок, мм                              | 0,15—0,21 | 0,21—0,3 | 0,3—0,45 |
| $Q(t) = \Delta U_{ВП}(0,25с) / \Delta U_{ВП}(2с)$ | 3,70      | 3,35     | 2,85     |

Заметное замедление спада ВП с увеличением размера зерен было обнаружено и в наших опытах.

Менее четки изменения скорости спада в зависимости от влажности и концентрации электролита. По нашим данным,  $\tau$  в зависимости от влажности сначала несколько уменьшается, вплоть до  $W = 0,05$ , затем постепенно возрастает. Ту же тенденцию установил И. И. Рокитянский [237], указав, что у влагонасыщенных песков ВП при зарядке 5 с достигает более 90% своего предельного значения, а у слабовлажных песков зарядка длится многие минуты. Увеличение концентрации раствора приводит к возрастанию скорости нарастания и спада ВП. Наконец, все исследователи единодушно подчеркивают резкое ускорение спада при сокращении длительности зарядки. Причина этого связана с общими свойствами электрических процессов.

Б. Я. Кудымов и П. Т. Котов [166] проверили сделанный ранее В. Н. Дахновым [83] и его сотрудниками [174, 175, 177] вывод

о зависимости ВП от проницаемости пород. Образцы замачивали в 0,04 н. растворе NaCl. Предварительно у них измеряли газопроницаемость  $\mu$ . Результаты измерений представлены на рис. 22. Данные согласуются между собой и указывают на закономерное уменьшение поляризуемости с увеличением проницаемости пород. Вместе с тем можно обратить внимание на спад ВП при очень малых проницаемостях и максимум в области проницаемостей  $0,02—0,05$  мкм<sup>2</sup>, что напоминает о выводе, сделанном И. И. Рокитянским на основании изучения кварцевого песка.

Б. Я. Кудымов и П. Т. Котов [166] проверили также вывод М. Г. Латышовой [174] о том, что ВП глинистых пород линейно повышается с ростом удельного сопротивления раствора, насыщенного породу. В их опытах глина пропитывалась раствором NaCl различной концентрации. Зависимость поляризуемости от удельного сопротивления раствора оказалась близкой к линейной,

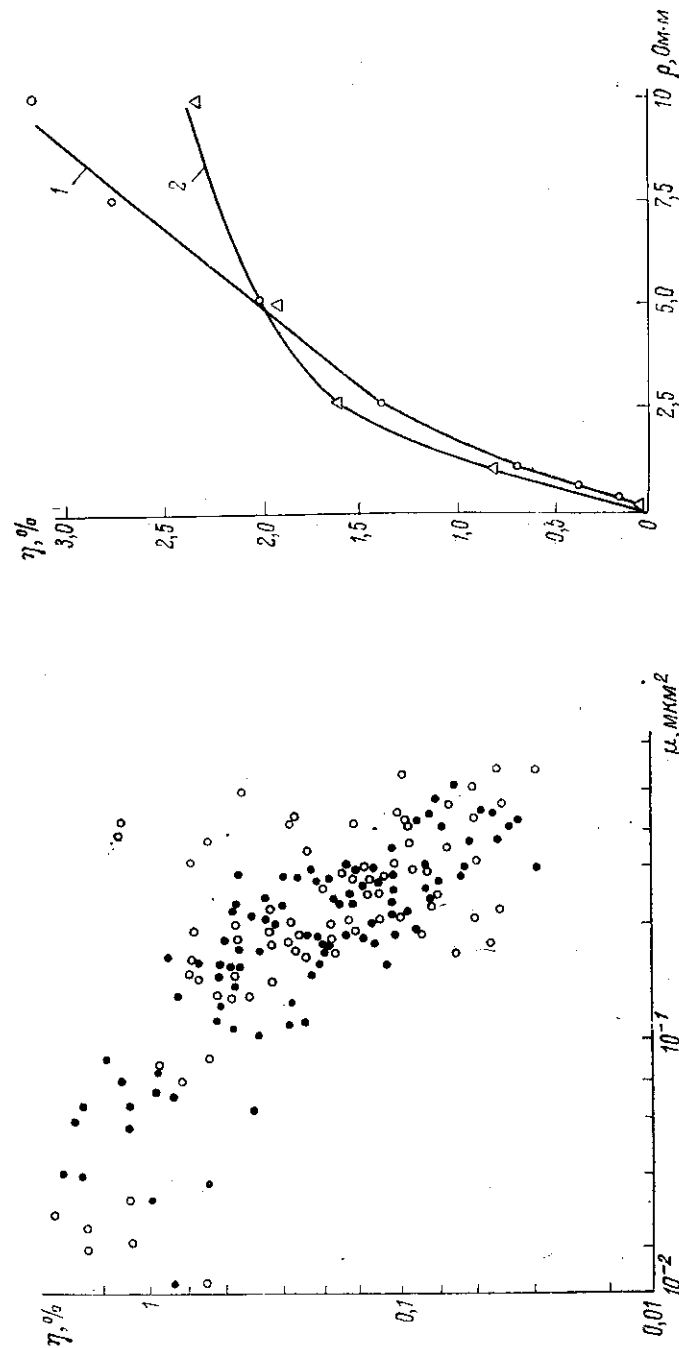


Рис. 22. Зависимость поляризуемости песчинок от их проницаемости.

Черными кружками обозначены данные М. Г. Латышовой, светлыми — Б. Я. Кудымова и П. Т. Котова [166].

Рис. 23. Зависимость поляризуемости песчаной породы 1 и глины 2 от удельного сопротивления раствора [166].

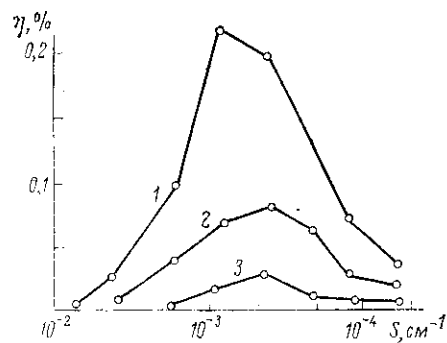


Рис. 24. Зависимость полярзуемости от удельной поверхности образцов песка при различном удельном сопротивлении раствора KCl, насыщающего образцы [136].

$\rho$ , Ом·м: 1 — 700, 2 — 270, 3 — 63.

особенно в области относительно высокой концентрации раствора (рис. 23). Аналогичный результат дали опыты А. Ф. Постельникова [227].

Экспериментальные данные использованы С. Г. Комаровым [135] для вывода о преждевременности применения метода ВП для определения коллекторских свойств осадочных пород, поскольку ВП зависит от многих факторов, а требуемая для решения нефтепромысловых задач точность определения проницаемости не достигнута. Последующая полемика [86, 136] стимулировала новые исследования ВП. Подтверждено существование экстремума на зависимости ВП от проницаемости и удельной поверхности осадочных пород. На рис. 24 приведены результаты опытов с образцами песка и маршаллита [136], имеющими разную удельную поверхность. Образцы насыщались раствором KCl с удельным сопротивлением 700, 270 или 63 Ом·м. Зависимость полярзуемости от удельного сопротивления раствора и в этой серии опытов была близка к линейной.

Вопрос о практическом применении метода ВП в нефтепромысловой геофизике остался дискуссионным. Геофизик И. Морино пришел к выводу, что параметров, определяющих ВП, так много, что надежды на успешное применение метода ВП мало [381].

Зависимость ВП от температуры породы первыми исследовали Б. Я. Кудымов и П. Т. Котов [166]. В табл. 10 приведены результаты изменения полярзуемости песчаника при нагревании и последующем охлаждении. Значение  $A = \Delta U_{ВП} / I$  при нагревании образца от 1,5 до 90° С уменьшилось почти втрое. Однако полярзуемость изменилась мало. Авторы объяснили это тем, что от температуры зависит лишь омическое сопротивление породы, которое уменьшается с ростом температуры.

Позднее Э. Н. Кузьмина [169] изучила полярзуемость глин при понижении температуры от 16 до —7° С и обнаружила, что она меняется очень слабо: от 0,70 до 0,78%, т. е. в пределах возможной погрешности опытов. При тех же условиях удельное сопротивление глин возросло в 30 раз: от 26 до 800 Ом·м. Э. Н. Кузьмина высказала мнение, что ВП обусловлена процессами в связанной

ТАБЛИЦА 10

Изменения ВП песчаника с температурой  
(по Б. Я. Кудымову и П. Т. Котову [166])

| Нагревание |            |             |          | Охлаждение |            |             |          |
|------------|------------|-------------|----------|------------|------------|-------------|----------|
| $T$ , °С   | $\eta$ , % | $A$ , мВ/мА | $J$ , мА | $T$ , °С   | $\eta$ , % | $A$ , мВ/мА | $J$ , мА |
| 1,5        | 2,21       | 154,0       | 0,94     | 74,0       | 2,44       | 55,5        | 2,74     |
| 13,5       | 2,32       | 141,5       | 1,02     | 55,0       | 2,35       | 59,3        | 2,46     |
| 22,5       | 2,22       | 100,2       | 1,34     | 39,5       | 2,32       | 70,5        | 2,12     |
| 38,0       | 2,56       | 87,5        | 1,74     | 25,0       | 2,28       | 90,2        | 1,77     |
| 61,0       | 2,68       | 67,0        | 2,22     | 16,0       | 2,08       | 98,0        | 2,04     |
| 90,0       | 2,26       | 58,5        | 3,07     |            |            |             |          |

воде, не замерзающей при температуре —7° С, между тем как удельное сопротивление породы определяется прежде всего количеством рыхлосвязанной воды, замерзающей при —1° С.

Зависимость полярзуемости песчано-глинистых пород от содержания в них глины сначала подметили В. Вакье и др. [218, 395]. Затем многие американские исследователи [339, 373, 380, 388] отвели главную роль в механизме возникновения ВП глинам, имеющим большую емкость ионного обмена. По их мнению, породы, не содержащие глинистых минералов, поляризуются очень слабо. Основанием послужили опыты с влагонасыщенным песком, содержащим раствор со значительной концентрацией солей, когда и по нашим данным поляризация весьма мала.

В. Вакье и другие [218, 395] установили, что полярзуемость глинистого песка велика в случае, если глина обволакивает песчинки, а не сосредоточивается между ними. Э. Н. Кузьмина [169] исследовала смеси кварцевого песка (диаметр частиц 0,5—1 мм) с монтмориллонитом, содержание которого последовательно менялось от 0 до 100%. Даже 1%-ная примесь монтмориллонита увеличила полярзуемость в 5 раз по сравнению с чистым песком. Максимум полярзуемости отмечен при содержании глины от 3 до 10%. При большем содержании глины полярзуемость упала (до 0,1% при максимальном значении  $\eta = 2,5\%$ ). В опытах с песком, содержащим 5% монтмориллонита, Э. Н. Кузьмина определила, что максимум  $\eta$  наступает при влажности 10—19%.

Э. Н. Кузьмина подтвердила закономерное ускорение становления ВП у песка, насыщенного концентрированным электролитом (5 г/л), по сравнению с насыщенным дистиллированной водой, а также у мелких фракций по сравнению с крупными.

По данным Л. Андерсона и Дж. Келлера [330], максимум полярзуемости наступает при объемном содержании монтмориллонита 0,1—0,4%, а каолина, имеющего большую емкость ионного обмена, — при 3—12%. С ростом концентрации внутрипорового раствора объемное содержание глинистых минералов, соответствующее максимуму полярзуемости, увеличивается.

Песчано-алевритовые породы Армении изучал Сами Солиман Мохамед. Он получил согласующиеся с другими исследованиями данные о большей скорости зарядки у пород с малой пористостью (9%), по сравнению с породами с большой пористостью (38%). Изученные им породы имели маленькую проницаемость — не больше  $10^{-3}$  мкм<sup>2</sup>. Повышение проницаемости привело к росту поляризуемости. От пористости пород зависит их плотность. Поэтому при возрастании плотности от 2,16 до 2,5 г/см<sup>3</sup> поляризуемость несколько увеличивается.

Во всех случаях увеличение концентрации электролита приводит к уменьшению поляризуемости [185, 169, 174, 227, 395]. Глины в природных условиях обычно содержат значительное количество растворенных солей. Этой причиной М. Г. Латышова [174] объяснила низкую поляризуемость глин. С. Г. Комаров и П. Т. Котов [136] указали дополнительный фактор — большую удельную поверхность осадочных пород.

#### Поляризация кристаллических пород

Для измерения массивных образцов горных пород в ВИТР создана лабораторная установка, конструкция которой показана на рис. 25. Образец 1 помещается между двумя блоками электродов 2. Каждый блок содержит два неполяризуемых электрода — токовый 3 и измерительный 4, которые внутри блока отделены друг от друга изоляционной перегородкой, чтобы предотвратить ВП измерительного электрода. Корпус блока изготовлен из органического стекла или иного изолятора. В корпусе блока две полости 5, 6, в которые заливается медный купорос и опускаются медные стерженьки. Со стороны образца полости закрыты полупроницаемой пористой керамической пластинкой 7, через которую ток от токовых электродов попадает в образец. С помощью той же пластинки осуществляется контакт измерительных электродов с образцом. Для уменьшения фильтрации электролита из электродов раствор CuSO4 добавкой желатина или агар-агара приводится в студнеобразное состояние. Электропроводность раствора CuSO4 и пропитанной им керамической пластинки значительно выше, чем у монолитных горных пород. В силу этого измеряемая между измерительными электродами разность потенциалов практически равна падению напряжения на образце.

Надежный контакт блоков электродов с образцом обеспечивают зажимные винты 8, стержень 9, пропущенный через них, и корпус установки 10. Корпус установки 10 изготовлен из изолятора, чтобы устранить утечки тока и сделать для поляризующего тока единственным путь через образец. Для улучшения контакта между образцом 1 и керамическими пластинками 7 помещается слой влажной фильтровальной бумаги или ваты. Этот слой одновременно защищает образец от проникновения в него раствора из электродов. Бумагу или вату замачивают в той же воде, что и образец, и периодически обновляют.

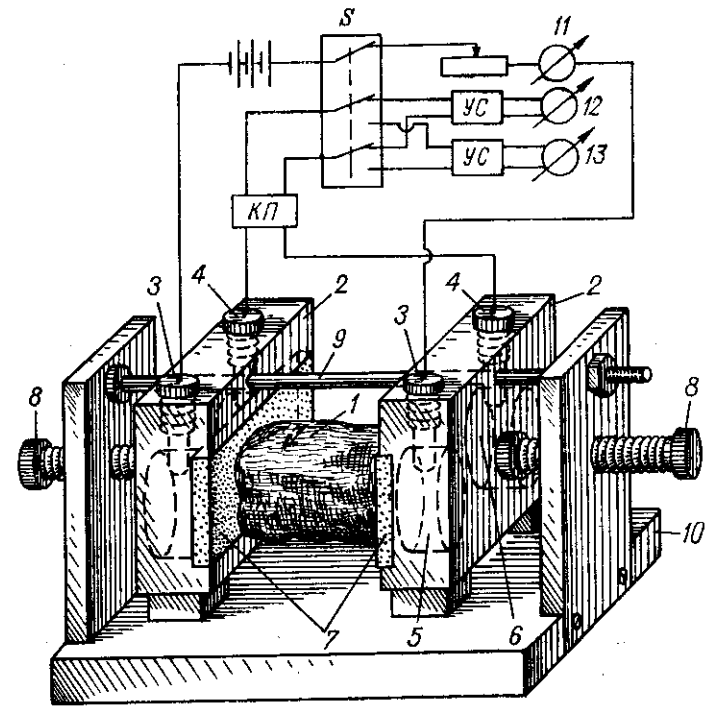


Рис. 25. Схема установки для измерений поляризуемости образцов горных пород.

1 — образец; 2 — блоки электродов; 3, 4 — измерительные электроды; 5, 6 — полости измерительных и токовых электродов для растворов CuSO4; 7 — керамические пластинки; 8 — зажимные винты; 9 — стержень; 10 — корпус установки; 11 — микроамперметр; 12, 13 — гальванометры  $\Delta U_{пр}$  и  $\Delta U_{ВП}$ .

При измерении поляризуемости образцов горных пород в качестве источника поляризующего тока обычно служит гальванический элемент 1,5 В. Сопротивление большинства образцов составляет десятки — сотни килоом, а пропускаемый ток — единицы — десятки микроампер. Соответственно выбирается прибор для регистрации тока 11. У образцов рыхлых пород \* сопротивление обычно на 1—2 порядка ниже указанного, и сила тока при том же источнике тока достигает десятых долей — единиц миллиампер.

Многоклеммный переключатель S служит для включения и выключения поляризующего тока и одновременного переключения чувствительности прибора для измерения  $\Delta U_{пр}$  или  $\Delta U_{ВП}$ . В измерительном канале гальванометрам 12, 13 обязательно предше-

\* Такие образцы замачивают и помещают в измерительную установку вместе с матерчатыми мешочками, в которых они хранятся.

ТАБЛИЦА 11

Зависимость поляризуемости образцов, не содержащих электропроводящих минералов, от влажности

| Образец                        |         | $\rho$ , КОМ | $\eta$ , % |
|--------------------------------|---------|--------------|------------|
| Силикатный кирпич              | Сухой   | 680          | 1,42       |
|                                | Влажный | 115          | 0,90       |
| Мелкокристаллический известняк | Сухой   | 2720         | 1,52       |
|                                | Влажный | 905          | 0,63       |
| Пегматит                       | Сухой   | 1050         | 1,63       |
|                                | Влажный | 101          | 1,57       |
| Гранит                         | Сухой   | 8000         | 4,10       |
|                                | Влажный | 150          | 1,95       |

Примечание. Под сухим в данном случае подразумевается так называемое воздушно-сухое состояние образцов, в котором они находятся при обычных условиях хранения, под влажным — состояние образцов после длительного замачивания в слабоминерализованной воде.

ствуется усилитель постоянного тока со входным сопротивлением не менее 1—2 МОм.

Среди деталей аппаратуры, не показанных на рис. 25, следует упомянуть устройство задержки времени, используемое во всех видах аппаратуры и обеспечивающее определенную паузу между выключением поляризующего тока и измерением  $\Delta U_{вп}$ .

Поляризуемость горных пород, не содержащих электропроводящих минералов, зависит прежде всего от их влажности и концентрации солей во внутрипоровой влаге. Об этом можно судить по данным табл. 11 и 12 \*, из которых следует, что поляризуемость сухих образцов выше, чем влажных. С увеличением концентрации раствора поляризуемость уменьшается. Эти закономерности по существу те же, что у осадочных пород.

В природных условиях породы находятся преимущественно во влагонасыщенном состоянии. Для соответствия образцы перед измерениями предварительно в течение нескольких часов замачивают в дистиллированной или слабоминерализованной воде, чтобы состав и концентрация солей стали близкими к естественным.

Сопротивление влажных образцов ниже, чем сухих, их измерения проще и надежнее. Сопротивление сухих образцов достигает единиц мегаомов и становится соизмеримым со входным сопротивлением измерительного прибора, когда точность измерений падает. По этой причине в табл. 11 поляризуемость образца гранита, вероятно, выше истинной.

При массовых измерениях среди образцов попадают содержащие включения электропроводящих минералов. Вообще вы-

\* Везде, где нет оговорок, численные значения поляризуемости соответствуют 2—3-минутной зарядке и разрядке, равной 0,5 с.

ТАБЛИЦА 12

Зависимость поляризуемости образцов, не содержащих электропроводящих минералов, от концентрации раствора

| Образец                                                                                             | $\eta$ , % |
|-----------------------------------------------------------------------------------------------------|------------|
| Кварцевый песок, содержащий 3,6% влаги, состоящей из раствора медного купороса разной концентрации: | 0,001 н.   |
|                                                                                                     | 0,01 н.    |
|                                                                                                     | 0,1 н.     |
|                                                                                                     | 2,10       |
| Силикатный кирпич, содержащий 3%: слабоминерализованной трубопроводной воды                         | 0,90       |
|                                                                                                     | 0,04       |
|                                                                                                     | 1,30       |
| концентрированного раствора медного купороса                                                        | 0,70       |

ТАБЛИЦА 13

Поляризуемость образцов керна скважин (Рудный Алтай, Грузия)

| Порода                                                     | $\eta_{ср}$<br>n | $\eta_{min}$<br>$\eta_{max}$ |
|------------------------------------------------------------|------------------|------------------------------|
| Суглинки                                                   | 0,74             | 0,24                         |
|                                                            | 23               | 1,47                         |
| Плагноклазовые порфириды                                   | 1,11             | 0,40                         |
|                                                            | 25               | 2,04                         |
| Плагноклазовые порфириды с редкой вкрапленностью сульфидов | 4,25             | 2,12                         |
|                                                            | 6                | 7,60                         |
| Туфы кислого состава                                       | 1,42             | 0,70                         |
|                                                            | 24               | 2,05                         |
| Туфы кислого состава с редкой вкрапленностью сульфидов     | 4,76             | 2,80                         |
|                                                            | 5                | 7,85                         |
| Серицито-кварцевые и хлорито-кварцевые сланцы              | 1,22             | 0,47                         |
|                                                            | 32               | 2,63                         |
| Аргиллиты                                                  | 1,98             | 0,65                         |
|                                                            | 9                | 3,20                         |
| Долерит с редкой вкрапленностью магнетита                  | 3,03             | 3,00                         |
|                                                            | 3                | 3,10                         |
| Кварцевый диорит                                           | 1,68             | 1,00                         |
|                                                            | 10               | 3,44                         |

n — число образцов; значение поляризуемости, %:  $\eta_{ср}$  — среднее,  $\eta_{min}$  — минимальное,  $\eta_{max}$  — максимальное.

ТАБЛИЦА 14  
Физические свойства горных пород и руд Южного Урала  
(по О. М. Шаповалову [303])

| Порода                                       | $\kappa$ , $10^{-6}$<br>ед. CGSM |                                                   | $\delta$ , г/см <sup>3</sup>   |                                                   | $\eta$ , %                   |                                               |
|----------------------------------------------|----------------------------------|---------------------------------------------------|--------------------------------|---------------------------------------------------|------------------------------|-----------------------------------------------|
|                                              | $\frac{\kappa_{\text{ср}}}{n}$   | $\frac{\kappa_{\text{min}}}{\kappa_{\text{max}}}$ | $\frac{\delta_{\text{ср}}}{n}$ | $\frac{\delta_{\text{min}}}{\delta_{\text{max}}}$ | $\frac{\eta_{\text{ср}}}{n}$ | $\frac{\eta_{\text{min}}}{\eta_{\text{max}}}$ |
| Альбитофиры и их туфы                        | $\frac{10}{2828}$                | $\frac{0}{1340}$                                  | $\frac{2,68}{2263}$            | $\frac{2,14}{3,46}$                               | $\frac{2,4}{552}$            | $\frac{0,1}{3,2}$                             |
| Эти же породы с вкрапленностью               | —                                | —                                                 | —                              | —                                                 | $\frac{6,9}{490}$            | $\frac{2,4}{55,0}$                            |
| Порфириды дацитового и андезитового состава  | $\frac{25}{348}$                 | $\frac{0}{1400}$                                  | $\frac{2,64}{220}$             | $\frac{2,10}{2,94}$                               | $\frac{1,66}{52}$            | $\frac{0,5}{4,0}$                             |
| Порфириды смешанного состава и туфопесчаники | $\frac{40}{226}$                 | $\frac{0}{767}$                                   | $\frac{2,72}{925}$             | $\frac{1,95}{288}$                                | $\frac{1,8}{67}$             | $\frac{0,2}{12,5}$                            |
| Известняки                                   | $\frac{0}{59,0}$                 | $\frac{0}{0}$                                     | $\frac{2,64}{15}$              | $\frac{2,6}{2,67}$                                | $\frac{1,3}{57}$             | $\frac{0,2}{2,0}$                             |
| Туфы и туфобрекчии диабазов                  | $\frac{130}{440}$                | $\frac{0}{3100}$                                  | $\frac{2,71}{90}$              | $\frac{2,37}{2,84}$                               | $\frac{3,5}{260}$            | $\frac{0,2}{22,0}$                            |
| Диабазы и диабазовые порфириды               | $\frac{2200}{293}$               | $\frac{0}{14\ 020}$                               | $\frac{2,8}{616}$              | $\frac{2,15}{2,99}$                               | $\frac{2,1}{78}$             | $\frac{0,8}{4,2}$                             |
| Порфириды базальтового состава               | $\frac{1850}{235}$               | $\frac{0}{15\ 900}$                               | $\frac{2,73}{204}$             | $\frac{2,52}{2,8}$                                | $\frac{2,5}{130}$            | $\frac{0,8}{3,0}$                             |
| Граниты, плагиограниты                       | $\frac{34}{9}$                   | $\frac{0}{274}$                                   | $\frac{2,68}{18}$              | $\frac{2,47}{2,78}$                               | $\frac{1,7}{6}$              | $\frac{0,2}{2,5}$                             |
| Кварцевые диориты                            | $\frac{620}{6}$                  | $\frac{7}{1350}$                                  | $\frac{2,63}{6}$               | $\frac{2,36}{2,7}$                                | $\frac{1,4}{10}$             | $\frac{0,4}{3,2}$                             |
| Гранодиориты                                 | $\frac{2640}{32}$                | $\frac{9}{6400}$                                  | $\frac{2,74}{81}$              | $\frac{2,56}{2,94}$                               | $\frac{1,8}{20}$             | $\frac{0,3}{3,5}$                             |
| Медный колчедан                              | $\frac{4,0}{28,0}$               | $\frac{0}{17}$                                    | $\frac{4,54}{22}$              | $\frac{3,12}{4,71}$                               | —                            | —                                             |
| Медно-цинковый колчедан                      | $\frac{0}{30,0}$                 | $\frac{0}{0}$                                     | $\frac{4,35}{7}$               | $\frac{4,32}{4,4}$                                | —                            | —                                             |
| Вкрапленные руды                             | $\frac{1,0}{53}$                 | $\frac{0}{18}$                                    | $\frac{3,2}{42}$               | $\frac{2,83}{4,40}$                               | $\frac{30,0}{122}$           | $\frac{15,0}{47,0}$                           |

деление безрудных пород условно, поскольку многие породы в качестве аксессуарных минералов содержат сульфиды или магнетит. В табл. 13 приведены значения поляризуемости влажных образцов керна скважин, отобранных главным образом на полиметаллических месторождениях Рудного Алтая. Образцы долерита взяты в Грузии. Из этих данных видно, что поляризуемость вулканогенных и интрузивных пород составляет в среднем 1—2% независимо от их петрографического состава. Поляризуемость меньше 1% свойственна аллювиальным суглинкам.

Лабораторные установки для измерений поляризуемости изготовлены во многих экспедициях, и исследования образцов проведены во многих районах [18, 298, 303].

Из опубликованных данных [303] составлена табл. 14, в которой поляризуемость почти двух тысяч образцов сопоставлена с их магнитной восприимчивостью и плотностью. Все породы при отсутствии в них сульфидов имеют поляризуемость от 1,3 до 2,5%, исключая лишь образцы (туфы диабазов и др.), средняя поляризуемость которых доходит до 3,5%, очевидно, за счет примеси электропроводящих минералов.

Среди изученных — интрузивные, эффузивные и туфогенные породы основного, среднего и кислого состава, а также известняки. Сколько-нибудь четких различий в поляризуемости, зависящих от петрографического состава, установить не удалось. Низкая поляризуемость оказалась даже у тех диабазов и порфиритов, которые содержали от 0,6 до 2,4% магнетита и обладали магнитной восприимчивостью, превышающей  $2000 \cdot 10^{-6}$  CGSM.

Я. М. Маркушин и др. [186] детально изучали образцы пород с высокой магнитной восприимчивостью, собранные на Алтае, и пришли к заключению, что присутствующие в породах аксессуарные примеси ферромагнитных минералов не создают высокой поляризуемости.

Как видно из данных табл. 14, наблюдаемые у массивных безрудных пород небольшие изменения плотности не влекут за собой заметных изменений поляризуемости. При значительных значениях трещиноватости и влажности пород их поляризуемость и плотность заметно уменьшаются.

Экспериментальные данные о существенной зависимости ВП от концентрации и состава электролита,  $\zeta$ -потенциала и других

параметров указывают на электрохимическую природу ВП. Важным доводом в пользу такой природы ВП служит и большое время ее установления. Поэтому первое объяснение ВП, выдвинутое К. Шлюмберже [316] и сводящее эффект поляризации к зарядке электрических конденсаторов, образующихся на каждом «зерне» породы на границе твердой и жидкой фаз, не могло лечь в основу теории явления. Вместе с тем надо сказать, что обусловленные эффектом ВП изменения напряжения и тока вполне можно

имитировать определенным набором конденсаторов и сопротивлений.

Физико-химические гипотезы возникновения ВП высказали А. С. Поляков [221], В. Н. Дахнов, М. Г. Латышова и В. А. Ряполова [85]. По их мнению, потенциалы ВП можно представить как потенциалы фильтрации, возникшие в результате происходящего во время зарядки электроосмоса. Известно, что в капиллярных системах протекание электрического тока сопровождается переносом электролита, т. е. электроосмосом, пропорциональным  $\zeta$ -потенциалу. Под действием электроосмоса может возникнуть перепад давления, вызывающий обратное течение жидкости после выключения электрического тока и соответствующие потенциалы фильтрации.

По этой гипотезе устанавливалась связь ВП с  $\zeta$ -потенциалом и через нее — со многими физико-химическими свойствами пород. Тем не менее впоследствии она подвергнута сомнению ее авторами [83, 177], хотя в принципе поддержана Ю. С. Рыссом [239], Б. Я. Кудымовым и П. Т. Котовым [167].

Почти одновременно с электроосмотической гипотезой М. Г. Латышова [174] предложила объяснение ВП за счет тангенциальной деформации внешней обкладки двойного электрического слоя на поверхности зерен породы. Механизм ВП представлен как смещение в поле электрического тока зарядов диффузной части двойного слоя, в результате чего каждое зерно уподобляется диполу, время образования которого определяется скоростью и «длиной пробега» ионов вдоль поверхности зерна. Эта гипотеза получила поддержку В. Н. Дахнова [83], В. М. Добрынина [88] и других. К тому же направлению относится статья автора [123], в которой дана количественная оценка поляризуемости, обусловленной перемещением зарядов двойного слоя. И. И. Рокитянский [238] основную роль в изменении плотности зарядов двойного слоя отвел нормальной к поверхности зерен составляющей приложенного электрического поля и вывел довольно сложное уравнение, связывающее поляризуемость с  $\zeta$ -потенциалом и другими характеристиками пород.

С помощью гипотезы о роли в процессах ВП деформаций двойного слоя удалось удовлетворительно объяснить порядок наблюдаемого значения поляризуемости и ее зависимости от влажности породы, концентрации электролита, размера частиц и др. Однако и эта гипотеза не раскрыла электрохимической сущности механизма поляризации.

Дальнейшим шагом в развитии теории ВП явились гипотезы, связавшие причину возникновения ВП с локальными изменениями концентрации раствора под действием перемещения ионов электрическим током. Первоначально изменения концентрации рассматривались лишь вблизи токовых электродов [83, 221], тогда для создания заметной поляризации, как показали расчеты С. М. Шейнманна, потребовалось бы много часов. Затем были

учтены изменения концентрации в микроучастках по всему объему породы, изображенной в виде системы чередующихся широких полостей и сужений. В. Вакье и его сотрудники [218, 395] и И. Шафл [403], приняв, что сужения перекрыты тонким слоем глины, объяснили ВП электродиализом глины, обладающей большой емкостью ионного обмена. Такую же систему, но без глины, рассмотрел А. Ф. Постельников [227]. Он показал, что разница в числах переноса ионов в порах различного сечения при пропускании тока приводит к изменению концентрации раствора и диффузионным потенциалам. Ему удалось качественно объяснить почти все известные из опытов закономерности ВП, но использованные структурные параметры оказались недоступными для экспериментальной проверки.

Аналогичную систему с позиций термодинамики рассмотрели и признали достаточной для возникновения ВП под действием переменного электрического тока Д. Маршалл и Т. Мэдден [380].

Д. А. Фридрихсберг и М. П. Сидорова [289] проанализировали перечисленные гипотезы и поддержали электродиффузионную гипотезу, выдвинутую А. Ф. Постельниковым, они теоретически обосновали ее с электрокинетических позиций и экспериментально проверили. В настоящее время электродиффузионная гипотеза наиболее полно отражает экспериментальные данные о природе ВП. Локальные изменения концентрации раствора и сопровождающие их диффузионные потенциалы возникают во всех местах, где меняется число переноса ионов. В узких капиллярах, соизмеримых с толщиной двойного электрического слоя (около 0,1 мкм) и имеющих избыток ионов за счет внешней обкладки двойного слоя, числа переноса ионов те же, что в широких капиллярах, где роль двойного слоя относительно мала. Узкие капилляры называют активными, а широкие — пассивными. К примеру, если в активных капиллярах число переноса катионов больше, чем в пассивных, то изменения чисел переноса положительны:

$$\Delta n = n'_k - n''_k = n''_a - n'_a > 0,$$

где  $n'_k$  и  $n''_k$  — числа переноса катионов в узком и широком капиллярах;  $n'_a$  и  $n''_a$  — числа переноса анионов в тех же капиллярах ( $n_k + n_a = 1$ ).

В этих условиях, как показано на рис. 26, прохождение тока слева направо приведет к росту концентрации у плоскости 1 и уменьшению ее у плоскости 2. Если до пропускания тока градиенты концентрации были постоянными, то по мере пропускания тока они различаются тем больше, чем больше изменение чисел переноса и сила тока в капиллярах. После длительного пропускания тока, когда будет достигнуто состояние равновесия между притоком электролита к плоскости 1 и обратным потоком диффузии, на каждом микроучастке, состоящем из узкого и широкого

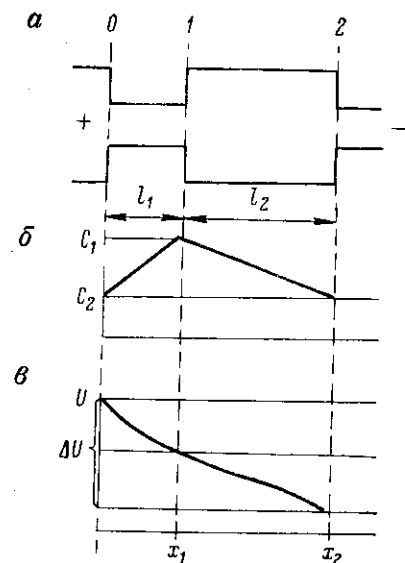


Рис. 26. Модель капиллярной системы (а) и распределение в ней концентрации электролита (б) и электрического потенциала (в) после длительного пропускания тока [289].

капилляров, падение потенциала

$$\Delta U_{\text{пр}} = \frac{A_1 l_1 + A_2 l_2}{C_1 - C_2} \ln \frac{C_1}{C_2}, \quad (12)$$

где  $A_1 = I/(\alpha_1 \lambda S_1)$ ;  $A_2 = I/(\alpha_2 \lambda S_2)$ ;  $I$  — сила тока в капиллярах;  $S_1, S_2$  — поперечное сечение узкого и широкого капилляров;  $l_1, l_2$  — длина капилляров;  $\alpha_1, \alpha_2$  — коэффициенты активности, учитывающие проводимость ионов двойного слоя;  $\lambda$  — эквивалентная электропроводность раствора;  $C_1, C_2$  — концентрация раствора на концах капилляров (в плоскостях 1 и 2 на рис. 26).

После выключения тока изменения концентрации, возникшие по краям сужений, создают диффузионные потенциалы, разность которых на рассматриваемом микроучастке

$$\Delta U_{\text{ВП}} = 2 \Delta n (RT/F) \ln (C_1/C_2), \quad (13)$$

где  $R$  — газовая постоянная;  $T$  — абсолютная температура;  $F$  — число Фарадея;  $\Delta n$  — разность чисел переноса в узком и широком капиллярах.

Поляризуемость равна отношению разностей потенциалов, описанных уравнениями (12) и (13):

$$\eta = \frac{2 \Delta n RT (C_1 - C_2)}{F (A_1 l_1 + A_2 l_2)}, \quad (14)$$

причем  $\eta$  имеет положительный знак, поскольку для  $\Delta n > 0$   $C_1 > C_2$ , а для  $\Delta n < 0$   $C_1 < C_2$  и знак  $\Delta U_{\text{ВП}}$  совпадает со знаком  $\Delta U_{\text{пр}}$ . Значение  $\eta$  не зависит от расстояния между измерительными электродами, так как  $\Delta U_{\text{ВП}}$  и  $\Delta U_{\text{пр}}$  по всем аналогичным между собой микроучасткам суммируются идентично. При разнотеленных сечениях и длинах капилляров в формулу (14), очевидно, входят средние «эффективные» параметры структуры.

Авторы формулы (14) Д. А. Фридрихсберг и М. П. Сидорова [289] преобразовали ее в следующую:

$$\eta = \frac{4 \alpha_1 \alpha_2 \varphi (\Delta n)^2}{(1 + \varphi) (\alpha_1 + \alpha_2 \varphi)} = \frac{4 \gamma \varphi (\Delta n)^2}{(1 + \varphi) (\gamma + \varphi)}, \quad (15)$$

где  $\gamma = \alpha_1/\alpha_2 = \sigma_1/\sigma_2$ ;  $\varphi$  — структурный параметр, равный отношению  $S_2 l_1/S_1 l_2$ ;  $\sigma_1, \sigma_2$  — электропроводность раствора в узком и широком капиллярах.

Выведенное уравнение связывает поляризуемость с электрохимической активностью капилляров на микроучастках ( $\Delta n_1$  и  $\Delta n_2$ ,  $\alpha_1$  и  $\alpha_2$ ) и со структурными параметрами этих участков. Достоинство этого уравнения состоит, в частности, в том, что входящие в него параметры можно определить экспериментально. М. П. Сидорова проверила суммирование диффузионных потенциалов в модельной системе, состоящей из последовательно соединенных ячеек с чередованием растворов  $1 \cdot 10^{-3}$  н. и  $3 \cdot 10^{-3}$  н. КСl и электрохимически активных и пассивных коллоидных мембран, затем измерила поляризуемость на модели, состоящей из чередующихся целлофановых (активных) и коллоидных (пассивных) мембран. Для той же модели экспериментально определены входящие в правую часть уравнения (15) параметры и вычислена  $\eta = 4,9\%$  (измеренное значение составляло 5,5%).

В дальнейших опытах на порошковых диафрагмах (кварцевый порошок, стеклянный бисер) обнаружено монотонное увеличение чисел переноса катионов в диафрагмах по мере снижения влажности и уменьшение поляризуемости при влажности менее 3%. Последнее М. П. Сидорова объяснила тем, что, хотя  $\Delta n_1$  и  $\Delta n_2$  продолжают расти, различие в электрохимической активности узких и широких капилляров уменьшается ( $\Delta n_1 \rightarrow \Delta n_2$ ). Это объяснение, по сути, не отличается от высказанного А. Ф. Постельниковым [227].

М. П. Сидорова изучила зависимости поляризуемости от температуры, содержания тонкодисперсной фазы в бентоните, структурно-механических свойств образцов. Результаты опытов согласуются с теми, что получили Б. Я. Кудымов и П. Т. Котов [167], Э. Н. Кузьмина [169], и подтверждают выдвинутые теоретические положения. Дополнительные доводы в их пользу получены при изучении ионитовых диафрагм, в которых твердое вещество (ионнообменная смола СБС или СДВ-3) обладает высокой электропроводностью и высокой электрохимической активностью. Поляризуемость таких диафрагм достигает 11—14%, т. е. значительно превышает наблюдаемую у горных пород, и вместе с тем согласуется с уравнением (15). Установлено также, что поляризация полностью отсутствует в гомогенных студнях желатин, но обнаруживается в гетерогенных гелях агар-агара ( $\eta \approx 0,2\%$ ).

Проверяя электроосмотическую гипотезу, Д. А. Фридрихсберг и М. П. Сидорова [289] экспериментально доказали, что электроосмотический перенос не может быть причиной ВП. В их опытах продавливание жидкости через поляризуемый образец привело к заметному уменьшению поляризуемости, независимо от направления движения жидкости. Возможные значения поляризуемости теоретически рассчитал Б. И. Геннадик [61—63], результаты

его расчетов свидетельствуют, что электроосмос не может быть главной причиной ВП.

Гипотезу, в которой для объяснения ВП служит процесс электролиза глин, нетрудно объединить с электродиффузионной, поскольку в обоих исходным пунктом служит изменение чисел переноса ионов в процессе пропускания электрического тока через неоднородную ионопроводящую среду, а также признание диффузии ионов фактором, определяющим временные свойства ВП.

Соответствующий путь предложил В. В. Кормильцев [154], выразивший поляризуемость через содержание в породе глины, концентрацию раствора, приведенную емкость поглощения глины и другие параметры, используемые в развитой Д. А. Шапиро теории диффузионно-адсорбционных потенциалов. Электродиффузионная гипотеза открыла возможность использования ВП для изучения разнообразных электрокинетических процессов, связанных с изменением чисел переноса. Поляризуемость, по мнению Д. А. Фридрихсберга, может служить характеристикой структуры капиллярных систем.

Следует упомянуть об идее итальянских ученых Н. Орилиа и Г. Петруччи [387], предложивших использовать ВП для изучения процесса затвердевания цемента. Разработанные к настоящему времени аппаратура и методика измерений вполне позволяют осуществить эту идею.

Уравнение (15) характеризует предельное значение ВП после достаточно длительной зарядки и сразу же после выключения тока. Процесс нарастания и спада ВП в той же системе капилляров теоретически исследовал В. В. Кормильцев [153], получивший зависимость ВП от времени в виде бесконечного ряда затухающих экспонент. Он показал, что при малых токах, обычно осуществляемых на практике, изменения концентрации пропорциональны плотности тока и процесс ВП линеен по отношению к току. Скорость нарастания и спада ВП определяется прежде всего структурой капилляров и тем больше, чем короче активные капилляры.

## ВЫВОДЫ

1. Поляризуемость ионопроводящих пород зависит от многих факторов: влажности и пористости, состава и концентрации раствора в порах породы, структуры и размера пор, содержания глинистых минералов и т. д. Максимальная поляризуемость наблюдается при слабой концентрации раствора, небольшой влажности (2—5%) и оптимальном размере пор (8—10 мкм), когда толщина пленки влаги сопоставима с толщиной двойного электрического слоя на контакте твердой и жидкой фаз.

От тех же факторов, но иным образом зависит удельное сопротивление пород; в итоге, породы с одинаковым удельным сопротивлением могут обладать различной поляризуемостью. Благодаря этому имеются предпосылки для использования метода ВП с целью дифференциации осадочных пород и решения гидрогеологических и инженерно-геологических задач. Дополнительные сведения о структуре пород можно получить при исследовании временных харак-

теристик ВП, поскольку с увеличением размера зерен породы скорость спада ВП замедляется.

2. Поляризуемость массивных кристаллических пород имеет уникальную среди физических параметров стабильность и практически не зависит от состава пород, сохраняя значение 1—2% у магматических и метаморфических пород. Изменения температуры мало влияют на поляризуемость, и она одинакова в различных климатических условиях.

Так как поляризуемость определяется толщиной слоя внутрипоровой влаги, эта особенность служит указанием на большую устойчивость толщины и свойств водной пленки в горных породах.

3. ВП ионопроводящих пород можно отнести к разряду электрокинетических явлений, связанных с существованием на границе твердой и жидкой фаз двойного электрического слоя.

Опытные данные находят объяснение в электродиффузионной гипотезе, согласно которой потенциалы ВП обусловлены локальными изменениями концентрации раствора при протекании электрического тока через капилляры, в которых число переноса ионов зависит от сечения капилляров и роли в них диффузной части двойного слоя. Уравнение, выражающее поляризуемость в виде функции электрокинетических и структурных параметров капиллярной системы, применимо также для описания поляризации пород, содержащих глинистые минералы, в которых видное место занимают процессы электролиза.

## ВП ПОРОД, СОДЕРЖАЩИХ ЭЛЕКТРОПРОВОДЯЩИЕ ВКЛЮЧЕНИЯ

Многие горные породы в большем или меньшем количестве содержат вкрапленность электропроводящих минералов. Поэтому в общем случае проводимость пород смешанная: ионная и отчасти электронная, а эффекты ВП обусловлены совокупностью процессов, происходящих на контактах электролита с изолятором и электронным проводником. В качестве параметра, характеризующего объемную поляризацию породы, содержащей электропроводящие включения, выступает поляризуемость, определяемая точно так же, как для «чистых» пород.

Вопрос о зависимости поляризуемости от содержания в породе электропроводящих минералов является узловым для определения рудно-поисковых возможностей метода ВП, и изучению этой зависимости посвящено много экспериментальных и теоретических работ [52, 53, 123, 128, 280].

Поляризация  
кварцевого песка  
с включениями  
электронных проводников

В ВИТР для опытов использовались те же лабораторные установки, что при изучении «чистого» песка (рис. 15, а, б). Аналогична и методика измерений. Плотность

поляризующего тока брали достаточно малой, чтобы поляризация электронных проводников оставалась линейной по отношению к току. В ходе опытов в образце меняли объемное содержание электропроводящих включений, состав и количество влаги.

На рис. 27 представлены результаты опытов на смеси кварцевого песка с порошком, приготовленным из полиметаллической руды Зырянского месторождения и из сульфидно-никелевой руды Печенгского месторождения. Исходный образец полиметал-

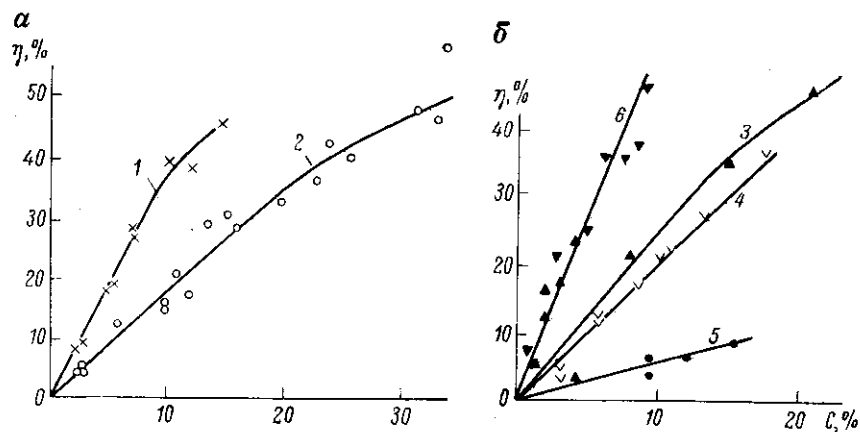


Рис. 27. Зависимость поляризуемости от объемного содержания в кварцевом песке вкрапленности частиц сульфидно-никелевой (а) и полиметаллической руды (б).

Плотность поляризующего тока 0,7 мкА/см<sup>2</sup>. Размеры частиц руды, мм: 1 — 5 и более, 2 — 2—4, 3 — свыше 4, 4 — 2—4, 5 — 0,1—0,5; 6 — результаты пересчета графиков 3—5 на содержание электропроводящих минералов.

лической руды содержал по объему 52% сфалерита, 20% галенита, 15% пирита, 10% халькопирита и 3% кварца. Образец сульфидно-никелевой руды состоял из 90% пирротина и 10% пентландита. Размеры зерен порошка менялись от 0,1 до 10 мм. Влажность песка составляла 5—10%.

Увеличение концентрации рудных включений сопровождалось ростом поляризуемости, примерно пропорциональным содержанию руды. Коэффициент пропорциональности оказался тем больше, чем крупнее зерна руды. Однако при детальном анализе порошка, приготовленного из полиметаллической руды, обнаружили, что средняя плотность мелкой фракции в 1,5 раза меньше, чем крупной. В ней уменьшилась доля, занимаемая тяжелым электропроводящим галенитом, по сравнению с непроводящими сфалеритом и кварцем. В средней фракции содержание электропроводящих минералов оказалось немного меньше, чем в крупной (соответственно 37,3 и 39,1%), а размеры электропроводящих зерен примерно одинаковыми. После пересчета на содержание электронных проводников зависимость поляризуемости от концентрации электропроводящих включений для разных фракций полиметаллической и сульфидно-никелевой руды выравнилась.

При изменении влажности песка наибольшую поляризуемость получили при влажности 5—10%, хотя роль влажности не столь решающая, как в «чистом» песке. Для определения роли удельной поверхности электропроводящих включений проведены опыты с кусочками железной проволоки, общее количество которых в исследуемом объеме песка сохранялось неизменным.

ТАБЛИЦА 15  
Зависимость поляризуемости, %, от числа связок  
железной проволоки в кварцевом песке

| Число связок | Число кусочков проволоки в каждой связке | Измеренная поляризуемость | Поляризуемость, определяющая эффект ВП вкрапленности |
|--------------|------------------------------------------|---------------------------|------------------------------------------------------|
| Чистый песок | —                                        | 1,79                      | 0                                                    |
| 1            | 60                                       | 2,28                      | 0,49                                                 |
| 2            | 30                                       | 2,56                      | 0,77                                                 |
| 3            | 20                                       | 2,95                      | 1,16                                                 |
| 12           | 5                                        | 3,75                      | 1,96                                                 |
| 60           | 1                                        | 5,73                      | 3,94                                                 |

Объемное содержание проволоки в песке 0,7%. Влажность песка около 7%.

Меняли число связок из проволоки, в которых кусочки проволоки плотно прилегали друг к другу и каждая связка выступала как единое электропроводящее включение. Опыты, результаты которых приведены в табл. 15, показали, что поляризуемость растет по мере увеличения удельной поверхности контакта электропроводящих включений с раствором.

Опыты проводились на установке, показанной на рис. 25, зарядка составляла 2 мин, время отсчета ВП 0,5 с после выключения тока. На массивных образцах проверены зависимости поляризуемости от концентрации электропроводящих включений, количества и химического состава внутрипоровой влаги. Результаты опытов, показывающих роль влаги, приведены в табл. 16 и 17.

У сухих образцов с вкрапленностью электронных проводников поляризуемость, как правило, меньше, чем у влажных. Это может служить одним из признаков для выделения образцов с вкрапленностью электропроводящих минералов.

Повышение концентрации раствора приводит к уменьшению поляризуемости образцов. При замачивании образцов вкрапленной медноколчеданной руды в пресной воде и децинормальных растворах сульфатов меди и железа поляризуемость уменьшалась в 1,2—3 раза, причем «худшую» роль играли ионы железа (табл. 17).

При изучении зависимости поляризуемости от концентрации электропроводящих включений образцы предварительно на несколько часов погружали в слабоминерализованную воду из ленинградского водопровода. Исследовали образцы с Маднеульского медноколчеданного месторождения. Содержание сульфидов вычислили по данным химического анализа тех интервалов керна

ТАБЛИЦА 16

Зависимость поляризуемости образцов пород, содержащих  
вкрапленность электропроводящих минералов, от влажности

| Образец                                       | Влажность | $\rho$ , кОм | $\eta$ , % |
|-----------------------------------------------|-----------|--------------|------------|
| Диабаз с вкрапленностью магнетита             | Сухой     | 123          | 18,3       |
|                                               | Влажный   | 36           | 43,2       |
| Долерит с редкой вкрапленностью магнетита     | Сухой     | 550          | 1,5        |
|                                               | Влажный   | 103          | 3,0        |
| Вторичный кварцит с вкрапленностью сульфидов  | Сухой     | 400          | 9,0        |
|                                               | Влажный   | 110          | 22,5       |
| Окварцованный туф с вкрапленностью сульфидов  | Сухой     | 450          | 2,6        |
|                                               | Влажный   | 130          | 7,5        |
| Окварцованный туф без вкрапленности сульфидов | Сухой     | 530          | 1,5        |
|                                               | Влажный   | 90           | 0,8        |

ТАБЛИЦА 17

Зависимость поляризуемости образцов вкрапленной  
медноколчеданной руды от состава влаги

| Номер образца | Объемное содержание сульфидов, % |             | $\eta$ , %         |                         |                                |                                                |
|---------------|----------------------------------|-------------|--------------------|-------------------------|--------------------------------|------------------------------------------------|
|               | Пирит                            | Халькопирит | Водопроводная вода | Децинормальные растворы |                                |                                                |
|               |                                  |             |                    | $\text{CuSO}_4$         | $\text{FeNH}_4(\text{SO}_4)_2$ | $\text{CuSO}_4 + \text{FeNH}_4(\text{SO}_4)_2$ |
| 1             | 12                               | 15          | 55                 | 44                      | —                              | 34                                             |
| 2             | 8                                | 10          | 54                 | —                       | 31                             | 30                                             |
| 3             | 8                                | 12          | 42,5               | 34                      | —                              | 26                                             |
| 4             | 2                                | 8           | 15                 | —                       | 5                              | —                                              |

скважин, с которых были взяты образцы, но не самих образцов; поэтому результаты опытов показывают корреляционную зависимость, тем более надежную, чем больше исследованных образцов.

Результаты опытов показали несомненную тенденцию к возрастанию поляризуемости по мере увеличения концентрации электропроводящих включений (рис. 28). Зависимость поляризуемости  $\eta^*$ , обусловленной электропроводящими включениями, от их концентрации аппроксимируется формулой

$$\eta^* = \beta \xi / (1 + \beta \xi), \quad (16)$$

где  $\xi$  — объемная концентрация включений;  $\beta$  — коэффициент, зависящий от состава и структуры включений, а также от времени измерений ВП после выключения тока.

В обсуждаемых опытах экспериментально определяли  $\eta^*$  и  $\xi$ . Это дало возможность для каждого из 33 образцов вкрапленной руды вычислить  $\beta$  по формуле

$$\beta = \eta^* / [\xi (1 - \eta^*)]. \quad (17)$$

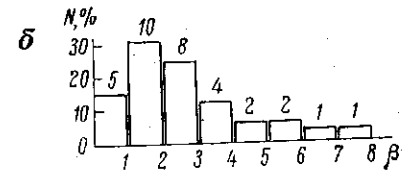
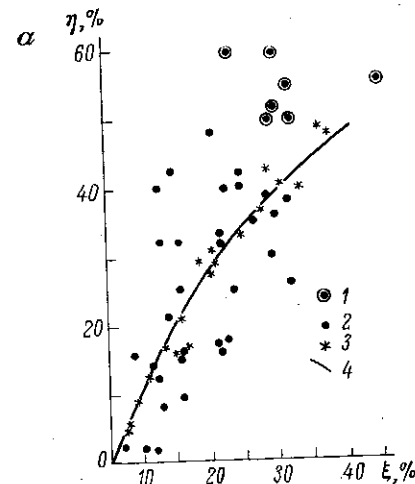


Рис. 28. Зависимость поляризуемости образцов медноколчеданных руд от объемного содержания в них сульфидов (а) и вариационная диаграмма вычисленных значений коэффициента  $\beta$  (б).

Числа показывают количество исследуемых образцов.  
Массивные образцы руды: 1 — брекчиевидной, 2 — вкрапленной; 3 — рыхлые образцы искусственной вкрапленной руды; 4 — рассчитанный по формуле (16) график функции при  $\beta = 2,6$ .

Семь образцов брекчиевидной руды, обладавших высокой электропроводностью, в расчет не принимали, поскольку в условиях опытов регистрировали лишь высокий эффект поверхностной поляризации на контакте образца с электродами. В 58% случаев  $\beta = 1 \div 3$ . Этот интервал изменений  $\beta$  можно считать наиболее вероятным. Среднее значение  $\beta = 2,6$ . Ему на рис. 28 соответствует теоретический график, вычисленный по формуле (16).

Поляризуемость «безрудных» пород с акцессорными включениями электропроводящих минералов сопоставил Ю. С. Рысс [242]. Поляризуемость измерена на обнажениях гранитоидов, метаморфических сланцев, аргиллитов, кислых эффузивов, диабазов и туфов кислого состава. Содержание пирита и более редких включений магнетита, халькопирита и галенита подсчитано по занимаемой ими площади в шлифах, изготовленных из образцов, отобранных на обнажениях. Оно составляло от десятых долей до 3—4% объема породы. Поляризуемость возрастала пропорционально содержанию электронных проводников от 1 до 3%. Коэффициент  $\beta$  составлял примерно 0,5.

По той же методике исследования поляризуемости вкрапленных руд провели на Южном Урале О. М. Шаповалов [303], в Таджикистане А. Н. Балашев, И. Д. Зимкин, Э. А. Сайганов [20]. Для образцов южноуральского медноколчеданного месторождения среднее значение  $\beta = 2,5$ . Для полиметаллических руд таджикских месторождений в зависимости от текстуры руды коэффициент  $\beta = 1,45 \div 4,5$ ; в среднем  $\beta = 3,0$ .

Несколько неожиданной оказалась взаимосвязь поляризуемости с вкрапленностью магнетита. О. М. Шаповалов [303] обратил внимание, что образцы порфирита, обладающие разнообразной магнитной восприимчивостью (до  $12\,000 \cdot 10^{-6}$  ед. CGSM) по

поляризуемости практически не различаются, хотя содержание магнетита меняется от 0,6 до 2,4%.

Я. В. Маркушин, В. Д. Борцов и Г. Г. Ткаченко [186] изучили образцы алтайских пород, содержащих магнетит. И также обнаружили, что многие образцы, обладающие высокой магнитной восприимчивостью, не имеют высокой поляризуемости. Причина осталась нераскрытой.

Между тем по единодушному утверждению всех исследователей магнетитовые руды, в которых относительный объем магнетита достигает десятков процентов, имеют весьма высокую поляризуемость. Способность магнетита поляризоваться сама по себе сомнений не вызывает.

На наш взгляд, причину «аномального» поведения магнетита следует искать в условиях его кристаллизации, определяющих его взаимоотношение с внутрипоровой влагой. Очевидно, эффект ВП возникает лишь в тех случаях, когда электронный проводник контактирует с влагой, заполняющей «сквозные» поры, служащие проводниками электрического тока в породе. Электропроводящие включения, окруженные плохопроводящим твердым веществом или приуроченные к закрытым порам, недоступны для воздействия тока. Последнее свойственно для микроскопических выделений магнетита, заключенных внутри породообразующих минералов. Но не только магнетита. Подобная «изоляция» может возникнуть и для сульфидов, сингенетичных с вмещающей породой.

Вероятно, в силу этого акцессорная примесь сульфидов мало сказывается на поляризуемости безрудных пород. Наиболее благоприятны для возникновения ВП условия кристаллизации рудных минералов из гидротермальных растворов, когда минералы приурочены к открытым порам, заполненным влагой. Для крупных включений магнетита и сульфидов условия кристаллизации не играют столь важной роли, поскольку такие включения не монолитны и пронизываются микроскопическими трещинками, по которым поступает влага.

Кроме того, определенную роль играет относительно быстрый спад ВП мелких включений. Условия описанных опытов рассчитаны на изучение поздней стадии ВП, когда разрядка мелких включений могла закончиться.

## ВЫВОДЫ

1. Вкрапленность электропроводящих минералов служит важнейшим фактором, влияющим на поляризуемость горных пород и руд. При вкрапленности, занимающей лишь 1—2% объема породы, поляризуемость может существенно превысить максимальный уровень, характерный для «чистых» пород.

2. Поляризуемость возрастает по мере увеличения удельной поверхности контакта электропроводящих включений с раствором. Рост объемной концентрации вкрапленности сопровождается в определенных пределах пропорциональным увеличением поляризуемости, причем коэффициент пропорциональности в практических условиях при  $t_3 = 2$  мин,  $t = 0,5$  с составляет от 0,5 до 4,5, в среднем 2,6.

3. На поляризуемость вкрапленников влияют количество и состав внутрипоровой влаги. Наибольшая поляризуемость наблюдается при слабой минерализации влаги, относительный объем которой достаточен для смачивания всех электропроводящих включений.

## ВРЕМЕННЫЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ ВП

### Общие положения

Зависимость наблюдаемого поля ВП от длительности зарядки и времени, прошедшего после вы-

ключения тока до момента отсчета ВП, во многом определяет требования, предъявляемые к аппаратуре, а также методику лабораторных и полевых работ. Поэтому почти все исследователи, начиная с К. Шлюмберже, так или иначе участвовали в обсуждении теоретических и практических аспектов проблемы временных и частотных закономерностей ВП. Определенная взаимосвязь временных и частотных характеристик вытекает из самых общих теоретических положений.

В. Н. Дахнов, М. Г. Латышова и В. А. Ряполова [85], заметив у пород разных спад ВП, высказали уверенность, что изучение закономерностей спада ВП приведет к созданию нового геофизического метода исследований минерального состава и структуры горных пород.

В. Бухгейм [342, 343] на основании теории предсказал зависимость временных и частотных характеристик ВП от размеров электропроводящих включений. Он предложил по виду частотной зависимости сдвига фазы напряжения на измерительных электродах относительно тока в линии АВ различать вкрапленное сульфидное оруденение и графитизированные породы. Его сотрудники И. Шраге и В. Андерс экспериментально исследовали зависимость сдвига фазы от размера и состава электропроводящих включений. При этом И. Шраге [402] не обнаружила существенных различий у сульфидных руд и графитизированных пород, а В. Андерс [326] нашел разделение возможным, но только при условии большого размера включений и значительной их концентрации в породе. Сам В. Бухгейм, проведя вместе с Д. Мальмквистом полевые исследования на рудном месторождении в Швеции, не получил убедительного подтверждения своей гипотезы [345]. Позднее неутешительные результаты получил и В. Андерс [327—329].

Более удачными оказались работы по использованию временных характеристик для выявления водоносных горизонтов [170, 347, 395]. В согласии с лабораторными данными, описанными ранее, в полевых условиях отметили замедление спада ВП над аллювиальными песчаными отложениями по сравнению с глинами и над коллекторами пресной воды по сравнению с пластами соленой воды.

В качестве временного параметра использовали отношение напряжения ВП в два момента спада:

$$\theta(t) = \Delta U_{ВП}(t_2) / \Delta U_{ВП}(t_1). \quad (18)$$

Выбор моментов  $t_1$  и  $t_2$  определялся изучаемым интервалом времени, который обычно составлял от 0,2 до 60 с при зарядке 2—3 мин [131, 206, 237, 269].

Многочисленные опыты на рудных месторождениях убеждали, что высокая поляризуемость электронных проводников сопровождается медленным спадом ВП [53, 155, 207, 235, 285], однако долгое время оставалось неясным, как из этого факта извлечь дополнительную информацию о текстуре или составе электронных проводников. Значение  $\theta(t)$  зависит не только от геологических условий опытов, но в еще большей мере от выбора моментов  $t_1$ ,  $t_2$  и длительности зарядки. Это, естественно, приводило к пессимистическим выводам [185, 379, 386, 412].

Лишь в последние годы временные характеристики ВП стали успешно использовать в производственной практике для детального изучения текстурных особенностей источников аномалий ВП и выделения на этой основе медноколчеданных и колчеданно-полиметаллических рудных тел среди пиритизированных и серпентинизированных пород [307]. Значительная заслуга принадлежит О. М. Шаповалову, который, создав специальную аппаратуру, первый начал изучать процессы ВП во время пропуска постоянного тока в весьма широком диапазоне времени — от 1 мс до 1—2 ч [305, 306]. При этом он совместно с автором разработал простую методику интерпретации наблюдаемых переходных характеристик ВП на основе вычисления дифференциальной поляризуемости.

Среди зарубежных исследователей, вероятно, наибольшего успеха достиг К. Зонге, разработавший аппаратуру, обеспечивающую высокую точность анализа взаимоотношения вещественной и мнимой составляющих напряжения переменного тока в диапазоне частоты от 0,01 до 110 Гц [424].

Экспериментальные исследования, выполненные с новой аппаратурой, не оставляют сомнений в том, что временные и частотные параметры ВП определяются размером, формой и составом электропроводящих включений, а также структурой породы и составом содержащейся в ней влаги [142, 305, 307, 414, 423].

#### Временной закон ВП

Установление закона, по которому ВП растет во время пропуска тока и спадает после выключения,

— важнейшая задача теории метода ВП. Исследователи высказали немало гипотез, но общее решение проблемы пока не найдено.

Экспериментальные кривые спада ВП аппроксимировали разнообразными аperiодическими функциями, которые можно разделить на четыре группы: экспоненциальные, гиперболические, логарифмические и функции, содержащие интеграл вероятности.

Предположение, что спад ВП является экспоненциальным, впервые высказал К. Шлюмберже [316], сопоставлявший его с разрядкой конденсатора. В. Н. Дахнов, М. Г. Латышова и

В. А. Ряполова [85] нашли, что такой спад присущ электронным проводникам и что формула

$$\Delta U_{\text{ВП}} = \Delta U_{\text{ВП}}(0) e^{-Kt}, \quad (19)$$

где  $K$  — постоянная спада;  $t$  — время после выключения тока;  $\Delta U_{\text{ВП}}(0)$  — начальное значение напряжения ВП при  $t = 0$ , удовлетворяет экспериментальным данным.

Однако Б. Я. Кудымов и А. Т. Котов [166] не обнаружили соответствия формулы (19) ни металлам и рудам, ни ионопроводящим породам. К такому же выводу пришли многие другие исследователи [131, 137, 395]. Аппаратура, разработанная для прямого измерения постоянной времени  $K$ , не нашла применения из-за неустойчивости отсчетов во время спада ВП.

При теоретическом рассмотрении задачи ответ в виде бесконечного ряда экспонент получили В. В. Кормильцев [153], Л. С. Чантуришвили [300], Б. И. Геннадик [61, 62], Г. А. Кричари и Е. К. Варфоломеева [162], К. Келлер [388], Д. Хенкел и Р. Ван-Ностранд [374]. Полученные экспоненциальные ряды зависели от принятых начальных и предельных условий и сделанных математических упрощений в решении уравнения диффузии. Содержащееся в рядах множество коэффициентов не нашло практических аналогов, но доступность автоматизации разложения кривых спада ВП в экспоненциальные ряды с помощью ЭВМ оставляет этот способ заманчивым до сих пор.

Г. П. Нечаева [206, 207] экспериментальные кривые спада ВП, полученные после 3-минутной зарядки, разлагала на сумму трех экспонент. Первую экспоненту, спадающую за 2—3 с, она объяснила процессами формирования двойного электрического слоя; вторую, затухающую через 7—8 с, — поляризацией рудных включений; третью, прослеживаемую в течение десятков секунд, — поляризацией вмещающих горных пород.

Простейшую гиперболическую функцию вида

$$\Delta U_{\text{ВП}} = \Delta U_{\text{ВП}}(0)/(1 + Kt) \quad (20)$$

Ю. С. Рысс еще в 1951 г. успешно применил для аппроксимации кривых спада ВП в интервале времени от 5 с до нескольких минут, полученных над моделями рудных тел в условиях 3—10-минутных зарядок. Д. Блейл [338] ту же формулу использовал для более ранней стадии ВП при зарядках от 0,15 до 1,27 с. Надо отметить, что функция (20) хорошо отображает экспериментальные кривые лишь на относительно узком интервале времени, соответствующем примерно 10-кратному изменению времени.

Более сложные гиперболы вида

$$\Delta U_{\text{ВП}} = \Delta U_{\text{ВП}}(0)/(1 + Kt)^m \quad (21)$$

имеют две постоянные времени:  $K$  и  $m$ .

М. Г. Латышова и Е. И. Леонтьев [121], положив  $K = 1 \text{ с}^{-1}$ , подбирали  $m$  и нашли, что для исследованных песчано-глинистых

пород она меняется от 0,8 до 1,4. Г. Носке [385] для аппроксимации кривых спада ВП, наблюдаемых над сульфидными месторождениями, принял  $m = 0,5$  и подбирал  $K$ .

Американские исследователи [218, 295] подбирали оба параметра. Аналогично поступил и В. А. Белаш [26], который этим параметрам придал смысл констант химических реакций, проходящих в горных породах под действием электрического тока. По его определению,  $m = 1,33 \div 1,50$ ,  $K = 0,17 \div 0,90$  на безрудных участках и  $0,05-0,07$  1/с над рудными месторождениями. При указанных значениях параметров удовлетворительная аппроксимация достигалась при 2—3-минутной зарядке и спаде от 3 с до 1—2 мин.

Логарифмическое уравнение

$$\Delta U = q - \frac{1}{K} \ln(t + d), \quad (22)$$

где  $q$ ,  $K$ ,  $d$  — константы, выведено для описания электродного потенциала в предположении, что он пропорционален логарифму плотности тока [340]. Д. Блейл рассмотрел его, но счит непригодным для выражения спада ВП [338]. Однако в дальнейшем многие нашли логарифмический закон наиболее подходящим для аппроксимации экспериментальных данных о временных и частотных характеристиках ВП как в лабораторных, так и в полевых условиях [8, 121, 237, 388].

Формула (22) не удовлетворяет предельному условию: при  $t \rightarrow \infty$   $\Delta U_{\text{ВП}} \rightarrow \infty$ . Более точной и удовлетворяющей предельным условиям является экспериментальная формула, полученная автором [131] из анализа кривых спада ВП при различной зарядке:

$$\Delta U_{\text{ВП}} = b \ln \frac{(t+g)(t+t_3+h)}{(t+h)(t+t_3+g)}, \quad (23)$$

где  $b$  — амплитудный параметр, пропорциональный поляризуемому току и имеющий размерность напряжения;  $t_3$  — время зарядки;  $t$  — время спада;  $g$ ,  $h$  — постоянные времени.

Для осадочных пород  $g = 1 \div 10$  с, для рудовмещающих магматических 5—30 с, для вкрапленных сульфидных руд — до сотен секунд, для сплошных руд — тысячи секунд. Значение  $h$  для пород и руд соответственно составляет от миллисекунд до единиц секунд. При  $t_3 \gg t$  и  $t < g$  функции (23) и (22) согласуются между собой.

Теоретические решения уравнения диффузии, содержащие интеграл вероятности Гаусса, довольно широко используются в электрохимической литературе [81]. Среди исследователей ВП такого вида решение для плоского контакта электронного проводника с раствором получили сначала Д. Мальмквист [379], затем Л. Андерсон и Дж. Келлер [330] и более строго С. М. Шейнманн [313].

Наиболее тщательно и всесторонне теорию поляризации электронных проводников разработал В. В. Кормильцев со своими

сотрудниками [108, 159]. Он показал, что при отсутствии концентрационной поляризации переходный процесс, обусловленный током зарядки емкости двойного слоя и перенапряжением адсорбции, описывается комбинацией двух экспонент, составляющих раннюю стадию ВП\*. В условиях концентрационной поляризации, когда реагирующие ионы составляют незначительное меньшинство в растворе, спад ВП сферического включения выражается формулой

$$\Delta U_{\text{ВП}} = b [e^{Qt} \operatorname{erfc} \sqrt{Qt} - e^{Q(t+t_3)} \operatorname{erfc} \sqrt{Q(t+t_3)}], \quad (24)$$

где  $Q$  — постоянная времени, прямо пропорциональная коэффициенту диффузии и обратно пропорциональная коэффициенту пористости вмещающей среды и квадрату радиуса включения;

$$\operatorname{erfc} x = 1 - \frac{2}{\sqrt{\pi}} \int_0^x e^{-u^2} du. \quad (25)$$

А. А. Рыжов, Г. Я. Черняк, Н. Н. Шарапанов и В. А. Попов [240, 241] нашли формулу (24) наиболее удобной для аппроксимации экспериментальных данных о поляризации как электронных проводников, так и ионопроводящих осадочных пород.

Наличие в поляризуемой среде включений разного размера и состава, изменения ее пористости, концентрации и состава раствора, а также другие причины приводят к разнообразию постоянных времени компонентов среды и к соответствующему суммированию их временных характеристик. Результирующая кривая спада ВП, в общем, не может быть выражена какой-либо функцией с одним временным параметром. Логарифмической функцией (23) с двумя параметрами удастся аппроксимировать относительно широкий набор экспериментальных кривых. Функции (23) и (24) довольно близки друг к другу, если  $\sqrt{g/h} = 34$  и  $Q\sqrt{\pi} = (gh)^{-1/2}$ . Довольно сложно подобрать к экспериментальным кривым аналитические функции.

Наибольший практический интерес представляют способы изучения временных характеристик, не предопределяемые видом той или иной избранной исследователем функции. Детальный анализ различных способов сделал И. С. Михельсон, предложивший несколько оригинальных параметров [199, 200].

В 1955 г. Ю. С. Рысс [239]

Взаимосвязь ВП во время  
зарядки и разрядки

предложил измерять поле ВП  
в процессе зарядки и разрядки,  
чтобы разделять поляризацию

электронных и ионных проводников. Он исходил из предположения, что ток ВП в ионопроводящих породах в период зарядки направлен противоположно поляризуемому току, а после выключе-

\* Экспериментальная формула (5), предложенная А. П. Карасевым и О. В. Бумагиным [115] для аппроксимации ранней стадии ВП, содержит одну экспоненту, но с показателем степени, который зависит от времени как эффективная емкость двойного слоя.

чения тока меняет свое направление. В электронных проводниках ток ВП всегда направлен навстречу поляризующему току, поэтому в период зарядки ток ВП представляет собой разность токов ВП, порождаемых электронными и ионными проводниками, а в период разрядки — их сумму. Определив поле ВП в периоды зарядки и разрядки, можно разделить электронные и ионные проводники и тем самым решить важную задачу.

Для проверки предположения Ю. С. Рысса в ВИТР в 1955 г. выполнены лабораторные и полевые исследования со специально разработанной Л. М. Иоффе аппаратурой, которая обеспечила высокую точность регистрации изменений напряжения на измерительных электродах и силы тока в токовой линии. На входе шлейфного осциллографа были специальные компенсаторы, включавшиеся синхронно с включением поляризующего тока. На гальванометры подавалась лишь переменная часть напряжения и тока. Запись во время зарядки и разрядки производили на одной и той же чувствительности измерительных устройств. Примеры осциллограмм приведены на рис. 29.

Опыты показали, что взаимосвязь эффектов ВП во время зарядки и разрядки у электронных и ионных проводников совершенно одинакова, нет инверсии направления тока ВП в ионных проводниках. Изменения напряжения и тока в процессе зарядки увязываются с напряжением ВП следующим образом:

$$\frac{\Delta U(T) - \Delta U_0}{\Delta U_0} = \frac{I(T) - I_0}{I_0} = \frac{\Delta U_{ВП}(T)}{\Delta U_0}, \quad (26)$$

где  $\Delta U_0$ ,  $\Delta U(T)$  — полное напряжение на измерительных электродах во время зарядки, в начальный и конечный моменты наблюдений;  $\Delta U_{ВП}$  — напряжение ВП на тех же электродах;  $I$  — сила тока в токовой линии.

Уравнение (26) является прямым следствием формулы (2), представляющей собой обобщенную форму закона Ома в случае наличия сторонних электродвижущих сил. Экспериментальное подтверждение этого закона для объемной поляризации горных пород имеет важнейшее значение для обоснования феноменологической теории метода ВП.

Как видно на рис. 29, во время пропускания тока напряжение на измерительных электродах может убывать или возрастать. Его поведение при нестабилизированном токе описывается следующим уравнением, вытекающим из формул (1) и (26):

$$\begin{aligned} \Delta U(T) &= I(T)R_{MN} + \Delta U_{ВП}(T) = \\ &= \Delta U_0 \left[ \frac{R_{AB}(0)}{R_{AB}(T)} \cdot \frac{U_{AB}(T) - \mathcal{E}_{AB}(T)}{U_{AB0}} \right] + \Delta U_{ВП}(T), \end{aligned} \quad (27)$$

где  $\Delta U_0$  — напряжение на измерительных электродах в момент включения тока, равное падению напряжения на омическом сопротивлении;  $U_{AB}$  — напряжение на токовых электродах (э. д. с. источника поляризующего тока);  $R_{AB}$  — сопротивление токовой

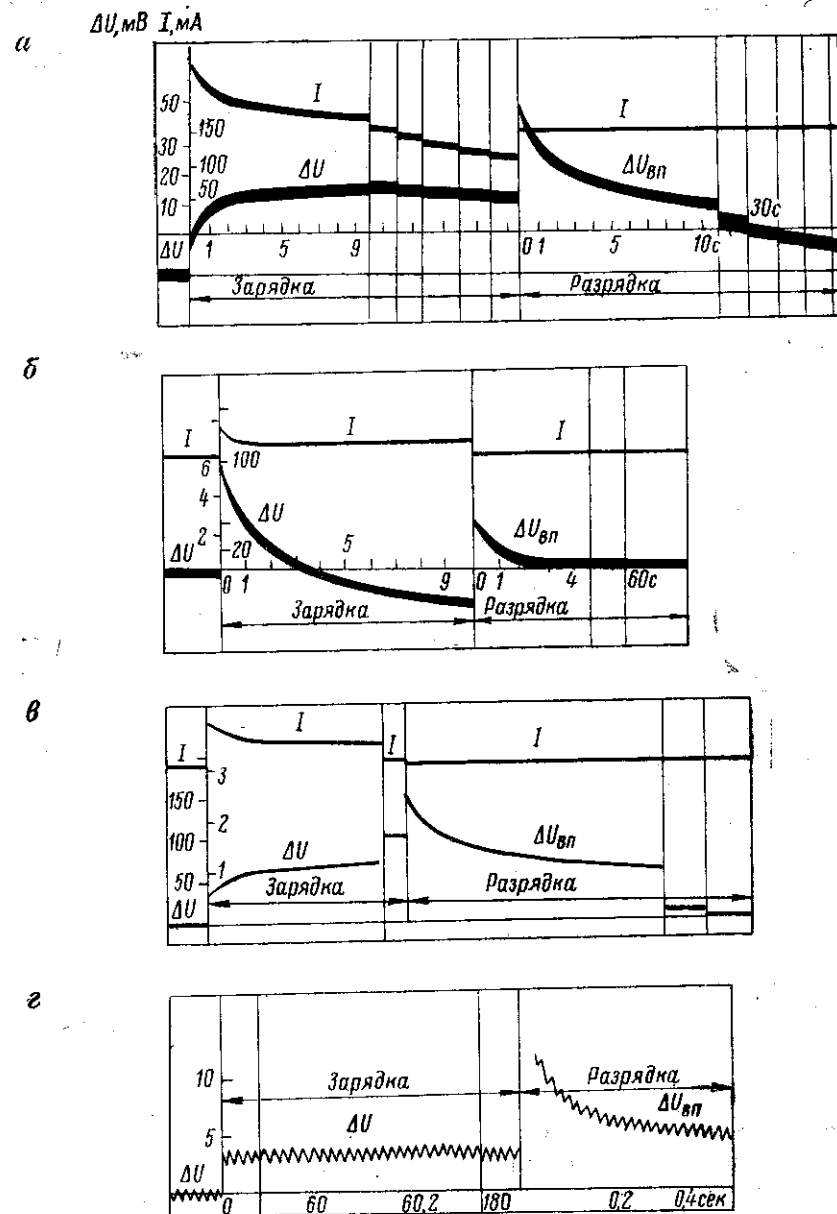


Рис. 29. Осциллограммы изменений напряжения на измерительных электродах и силы тока в линии АВ.

Полевые измерения: а — над рудным телом,  $J_0 = 3,30$  А,  $\Delta U_0 = 1035$  мВ; б — на безрудном участке,  $J_0 = 1,22$  А,  $\Delta U_0 = 680$  мВ. Лабораторные измерения: в — на образце известняка,  $J_0 = 0,29$  А,  $\Delta U_0 = 3230$  мВ; г — в условиях, когда измерительные и токовые электроды находятся в песке, напряжение на токовых электродах стабилизировано,  $\Delta U_0 = 1700$  мВ.

линии;  $\mathcal{E}_{AB}$  — полная э. д. с. ВП в токовой линии;  $\Delta U_{ВП}$  — напряжение ВП на измерительных электродах.

Аргументом служит время после включения тока:  $\Delta U_0 = I_0 R_{MN}$ , сопротивление среды между измерительными электродами  $R_{MN}$  считается постоянным\*.

Выражение в уравнении (27), помещенное в квадратные скобки, характеризует поведение тока, который нередко со временем уменьшается из-за возрастания сопротивления токовой линии в силу высыхания приэлектродных зон и уменьшения э. д. с. источника тока. Суммарный эффект ВП всего объема пород, охватываемого токовой линией, также вызывает уменьшение тока и соответствующий спад напряжения на измерительных электродах. Напротив, эффект ВП среды, находящейся между измерительными электродами, приводит к увеличению напряжения на измерительных электродах.

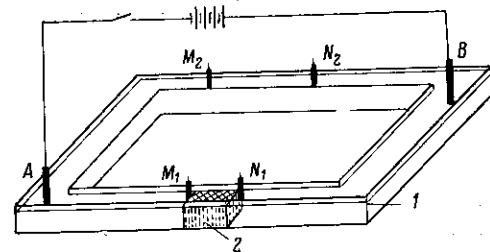
Если сопротивления токовой линии и э. д. с. источника тока постоянны, то поведение напряжения на измерительных электродах определяется соотношением средних поляризуемостей среды в пределах токовой и измерительной линий, отражаемых отношениями  $\mathcal{E}_{AB}/\Delta U_{AB}$  и  $\Delta U_{ВП}/\Delta U_0$ . Если токовые и измерительные электроды находятся в однородной среде, то напряжение во время зарядки неизменно, хотя ток уменьшается на значение поляризуемости, а после выключения тока обнаруживается  $\Delta U_{ВП}$  (рис. 29, г).

Если весь поляризуемый объект помещен между измерительными электродами, как при работах с лабораторной установкой, показанной на рис. 25, то во время зарядки наблюдается рост  $\Delta U$  независимо от того электроно- или ионопроводящий образец помещен между электродами (рис. 29, в).

В полевых условиях, когда не принимают специальных мер по стабилизации поляризующего тока, напряжение на измерительных электродах во время зарядки обычно растет, если электроды расположены над рудным телом (рис. 29, а), и падает, если они расположены над слабополяризуемыми осадочными породами (рис. 29, б).

Размыкание токовой линии, означающее  $R_{AB} \rightarrow \infty$ , приводит, в соответствии с уравнением (27), к тому, что регистрируется  $\Delta U_{ВП}$  на участке цепи  $MN$ . Но можно отключить от токовой линии источник поляризующего тока, а линию оставить замкнутой; тогда в ней наблюдается обратный ток ВП. Такие опыты выполнены с электронными проводниками на установке, изображенной на рис. 6. Для изучения образцов горных пород использовали установку, показанную на рис. 30. Сосуд с водой 1 имеет форму замкнутого кольца. Между одной парой измерительных электродов  $M_1N_1$  находится образец 2, являющийся источником э. д. с. ВП. Другая пара электродов  $M_2N_2$  служит для регистрации

Рис. 30. Схема установки для опытов с линией  $AB$ , замкнутой в период разрядки.  
1 — сосуд с водой; 2 — образец.



тока ВП, поскольку находящаяся между ними вода не поляризуется. Токовые электроды  $A$  и  $B$ , чтобы исключить влияние их поляризации, после окончания зарядки из сосуда вынимали. На обеих парах измерительных электродов напряжение во время пропускания тока и после его выключения имело один и тот же знак. Форма кривых спада ВП практически осталась той же, что и в условиях размыкания токовой линии.

Экспериментальные факты хорошо отображаются в эквивалентной электрической схеме, приведенной на рис. 5. При объемной поляризации среда представляется в виде множества последовательно включенных и чередующихся омических сопротивлений и элементарных э. д. с. ВП, между которыми могут находиться токовые электроды.

Общий вид взаимосвязи ВП во время зарядки и разрядки применительно к импульсам постоянного тока устанавливается на основе теории линейных электрических цепей. Линейность процесса ВП означает, что:

- 1) напряжение ВП при прочих равных условиях пропорционально силе поляризующего тока, а поляризуемость не зависит от силы тока;
- 2) временная характеристика ВП имеет одну и ту же форму при изменении направления тока (меняется лишь знак напряжения ВП);
- 3) эффект ВП, возникший после прямоугольного импульса тока, равен алгебраической сумме эффектов ВП, обусловленных двумя ступеньками постоянного тока, разнесенных во времени на длительность импульса и имеющих одинаковую амплитуду, но разное направление;
- 4) любой набор импульсов тока можно разложить на отдельные ступеньки тока и результирующий эффект ВП равен алгебраической сумме эффектов ВП этих импульсов и слагающих их ступенек.

Временную характеристику напряжения ВП, соответствующую одиночной ступеньке тока, назовем переходной характеристикой и обозначим  $F(T)$ \*. Будем считать, что ВП приведена

\* Рассматриваемые временные взаимоотношения одинаковы для потенциалов, разностей потенциалов и напряженностей любых вторичных полей, линейных по отношению к возбуждающему току. Поэтому, чтобы подчеркнуть общий характер приводимых формул, используем абстрактные обозначения.

\* Электродинамические индукционные эффекты не учтены.

к единице тока и тем самым учтено первое условие линейности процесса ВП. Из второго условия следует, что спад напряжения ВП после бесконечно долгого импульса постоянного тока имеет ту же форму, что и переходная характеристика, но в иной системе координат [420]. Связь между ними выражается формулой

$$F(t) = F_{\infty} - F(T), \quad (28)$$

где  $F(t)$  — напряжение ВП после выключения тока;  $F_{\infty}$  — предельное напряжение ВП во время зарядки;  $T$  — время, отсчитанное от момента включения тока;  $t$  — время, отсчитанное от момента выключения тока, причем в рассматриваемом частном случае  $t = T$ .

Третье условие означает, что напряжение ВП после произвольного импульса длительностью  $t_3$  представляет собой разность напряжений ВП, охарактеризованных формулой (28) и различающихся аргументом переходной характеристики:

$$F^*(t) = F(t) - F(t + t_3) = F(T_2) - F(T_1) = \Delta F(\Delta T). \quad (29)$$

Напряжение ВП после выключения тока равно приращению переходной характеристики за интервал времени  $\Delta T = t_3$ , от  $T_1 = t$  до  $T_2 = t + t_3$ . С другой стороны, если известна форма спада ВП после достаточно длительного импульса тока  $F(t)$ , то нетрудно графически, как показано на рис. 31, получить кривую спада для любого короткого импульса  $F^*(t)$ .

Четвертое условие означает применимость аналогичного построения для любой совокупности одинаковых по длительности импульсов, если известна кривая спада ВП для одиночного импульса (рис. 32).

Если известна кривая спада ВП после одиночного импульса тока в интервале времени, превышающем длительность импульса в несколько раз, то нетрудно построить соответствующий интервал переходной характеристики. Для этого надо определить и просуммировать напряжения ВП в моменты времени, отстоящие друг от друга на длительность зарядки. При этом начальный момент записи спада  $t_n$  принимается за начало восстанавливаемой переходной характеристики, так что  $T_n = T_1 = t_n$ . В последующие моменты времени  $T_2 = T_n + nt_3$ , где  $n$  — число интервалов, равных  $t_3$ ; в соответствии с формулой (29) напряжение ВП во время зарядки

$$F(T_n + t_3) = F(T_n) + F^*(t_n), \quad (30)$$

$$F(T_n + 2t_3) = F(T_n) + F^*(t_n) + F^*(t_n + t_3). \quad (31)$$

В итоге, для последнего момента времени  $T_k$

$$F(T_k) = F(T_n) + \sum_{n=0}^N F^*(t_n + nt_3) = F(T_n) + \sum_{n=0}^N \Delta F_n, \quad (32)$$

где  $N$  — общее число интервалов  $t_3$ , укладываемых в исследуемый интервал времени спада ВП.

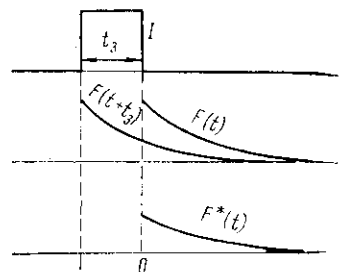


Рис. 31. Графическое построение кривой спада напряжения ВП, соответствующей короткому импульсу тока, по заданной кривой спада, соответствующей бесконечно долгому импульсу тока.

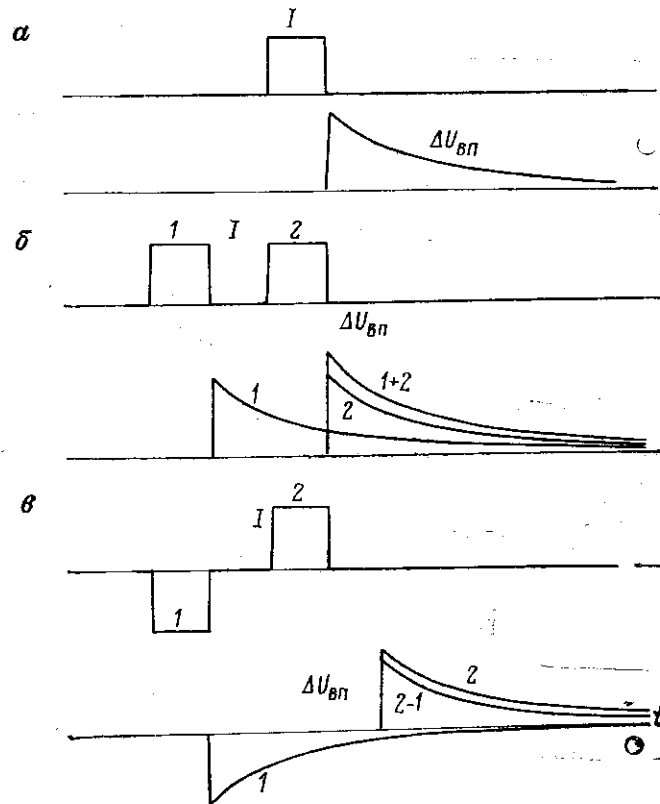


Рис. 32. Графическое построение кривых спада напряжений ВП по заданной кривой спада для одиночного импульса тока (а), для двух однополярных (б) и двух разнополярных (в) импульсов тока той же длительности.

Геометрический смысл суммирования напряжений ВП показан на рис. 33. Восстанавливаемый интервал переходной характеристики численно равен интервалу времени между первой точкой на кривой спада относительно момента выключения тока и последней точкой на этой кривой относительно момента включения тока.

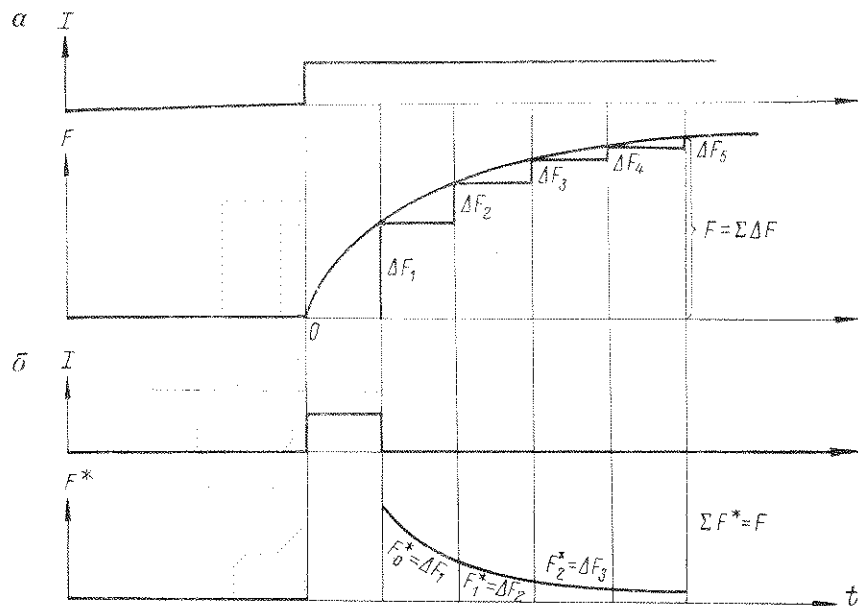


Рис. 33. Соотношение переходной характеристики ВП, соответствующей ступенеобразному возрастанию тока, (а) и кривой спада напряжения ВП после прямоугольного импульса тока (б).

Приближая первую точку отсчета ВП к моменту выключения тока, в пределе при  $t_n \rightarrow 0$ , когда  $F(T_n) \rightarrow 0$ , имеем

$$F(T) = \sum_{n=0}^N F^*(nt_3) = \sum \Delta F, \quad (33)$$

именно этот случай изображен на рис. 33.

При построении переходной характеристики сначала наносят точки с интервалом времени, равным  $t_3$ . Затем, если исходная кривая спада ВП непрерывна, точки можно сгустить вплоть до построения непрерывной линии. Для этого надо сначала проинтерполировать интервал переходной характеристики между двумя точками, лежащими в поздней стадии зарядки, когда рост ВП относительно невелик и линейная интерполяция не дает значительной ошибки. Затем отыскать  $F(T_1)$  по формуле, являющейся вариацией формулы (29):

$$F(T_1) = F(T_2) - F^*(t). \quad (34)$$

Значение  $F(T_2)$  известно после интерполяции;  $F^*(t)$  — измерено во время спада. Время  $T_1 = t$  берется по выбранной программе вычислений.

При построении переходной характеристики ВП по наблюдениям кривых спада ВП, в отличие от прямых измерений ВП в про-

цессе зарядки, не требуются высокая стабильность поляризующего тока и довольно сложный учет его изменений, что делает описанный способ доступным для широкого применения.

Связь ВП,  
создаваемой постоянным  
и переменным током

Выше показано, как результаты любых измерений ВП, осуществляемых с помощью импульсов постоянного тока, можно увязать с соответствующей переходной характеристикой ВП, т. е. с реакцией поляризуемого тела на ступенеобразное изменение тока. Свойства ВП на переменном и постоянном токе тоже сопоставимы между собой.

На переменном токе ВП измеряют двумя основными способами. В первом используют пару определенным образом выбранных частот тока и измеряют приращение напряжения на измерительных электродах при переходе от одной частоты к другой. Это приращение напряжения выступает в роли напряжения ВП, а его отношение к напряжению на одной из частот (обычно низкой) — в роли кажущейся поляризуемости [367, 372, 388]. За рубежом принято, как правило, использовать 10-кратное изменение частоты и называть кажущуюся поляризуемость процентным частотным фактором (Percent Frequency Factor):

$$PFF = \eta_k(\omega) = \frac{F(\omega_1) - F(\omega_2)}{F(\omega_1)} = \frac{\rho_k(\omega_1) - \rho_k(\omega_2)}{\rho_k(\omega_1)}, \quad (35)$$

где  $F(\omega_1)$  и  $F(\omega_2)$  — приведенное к одинаковому току напряжение на частотах  $\omega_1$  и  $\omega_2$  ( $\omega_1 < \omega_2$ );  $\rho_k(\omega_1)$  и  $\rho_k(\omega_2)$  — соответствующее тем же частотам кажущееся удельное сопротивление.

На измерение частотного фактора рассчитана аппаратура, многие виды которой разработал канадский геофизик Ф. Халлоф [366, 368, 369]. Такая аппаратура выпускается уже более 20 лет и нашла применение во многих странах мира [336, 358, 370, 389].

Разновидностью того же способа можно считать предложенный уральскими геофизиками [9, 157, 283, 284] метод частотной дисперсии (МЧД), в котором используют до 5 частот и более и вычисляют угловой коэффициент графика зависимости комплексной электропроводности от логарифма частоты. Применяемый коэффициент частотной дисперсии (КЧД) отличается от частотного фактора на множитель, равный логарифму отношения частот:

$$КЧД = \frac{\rho_k(\omega_1) - \rho_k(\omega_2)}{\rho_k(\omega_1) \lg(\omega_2/\omega_1)}; \quad (36)$$

если  $\omega_2/\omega_1 = 10$ , то  $КЧД = PFF$ .

Во втором способе измеряют сдвиг фазы напряжения относительно тока в токовой линии [5, 181, 192, 286]. Параметром служит угол сдвига фазы, выражаемый обычно в градусах, хотя,

с теоретической точки зрения, правильнее пользоваться безразмерной величиной тангенса угла сдвига фазы:

$$\operatorname{tg} \varphi_{\text{вп}} = \operatorname{Im} F(\omega) / [\Delta U_0 + \operatorname{Re} F(\omega)], \quad (37)$$

где  $\operatorname{Im} F(\omega)$  — мнимая составляющая напряжения;  $\operatorname{Re} F(\omega)$  — вещественная составляющая напряжения ВП;  $\Delta U_0$  — напряжение первичного поля.

Разновидностью второго способа является реализованный в советской аппаратуре ИНФАЗ-ВП и ВПФ прием измерений интервала времени между переходом через нуль напряжения первой и третьей гармоники, когда поляризующий ток имеет прямоугольную форму [286].

Теоретический переход от временной к частотной характеристике можно совершить с помощью известного интеграла Дюамеля [29]. С учетом обозначений, введенных в формулу (2), интеграл Дюамеля запишем в виде

$$\Delta U_{\sim} = I(T) R_{MN} + \int_0^T I(T - \tau) \frac{dR^*(\tau)}{d\tau} d\tau, \quad (38)$$

где  $\Delta U_{\sim}$  — искомое напряжение переменного тока;  $R_{MN}$  — омическое сопротивление участка цепи  $MN$ ;  $I(T)$  — заданная форма переменного тока;  $T$  — время после включения тока;  $R^*$  — переходное сопротивление участка цепи  $MN$ ;  $\tau$  — переменная интегрирования.

Переходное сопротивление

$$R^*(T) = R_{MN} + \frac{F_{\infty}}{I_{\infty}} F(T) = R_{MN} [1 + \eta_{\infty} F(T)], \quad (39)$$

где предельная поляризуемость

$$\eta_{\infty} = F_{\infty} / (I_{\infty} R_{MN}); \quad (40)$$

$I_{\infty}$  — сила постоянного тока;  $F_{\infty}$  — асимптотическое значение напряжения ВП;  $F(T)$  — переходная характеристика ВП.

В начальный момент после включения тока, если не учитывать электродинамические эффекты,  $F_0 = 0$  и  $R_0^* = R_{MN}$ ; при  $T \rightarrow \infty$   $F(T) \rightarrow 1$ .

Входящая в подынтегральное выражение производная переходного сопротивления не зависит от омического сопротивления и равна производной напряжения ВП:

$$\frac{dR^*(\tau)}{d\tau} = \frac{F_{\infty}}{I_{\infty}} \cdot \frac{dF(\tau)}{d\tau} = \frac{F_{\infty}}{I_{\infty}} F'(\tau) = R_{MN} \eta_{\infty} F'(\tau). \quad (41)$$

Зададим ток в виде косинусоиды

$$I(T) = I_0 \cos \omega T \quad (42)$$

и переходную характеристику ВП в виде экспоненциальной функции

$$F_1(T) = 1 - e^{-T/T_0}, \quad (43)$$

где  $T_0$  — постоянная времени ( $T_0 = 1/K$ ); тогда

$$F_1(\tau) = \frac{1}{T_0} e^{-\tau/T_0}, \quad (44)$$

и из уравнения (38) после интегрирования получим

$$\Delta U_{\sim} = I_0 R_{MN} \cos \omega T + \frac{I_0 F_{\infty}}{I_{\infty} (1 + \omega^2 T_0^2)} [\cos \omega T + \omega T_0 \sin \omega T - e^{-T/T_0}]. \quad (45)$$

Выражение в квадратных скобках характеризует временную зависимость ВП. Экспоненциальный член показывает, что в периодическом режиме тока время установления напряжения ВП такое же, что и при включении постоянного тока. После включения переменного тока спустя время, в несколько раз превышающее постоянную  $T_0$ , устанавливаются стационарные значения составляющих полного напряжения. Множитель при  $\cos \omega T$  дает вещественную составляющую

$$\operatorname{Re} \Delta U_{\sim} = I_0 R_{MN} + \frac{I_0 F_{\infty}}{I_{\infty} (1 + \omega^2 T_0^2)} = I_0 R_{MN} \left[ 1 + \eta_{\infty} \frac{1}{1 + \omega^2 T_0^2} \right], \quad (46)$$

где первый член — омическое напряжение, второй — напряжение ВП.

Множитель при  $\sin \omega t$  дает мнимую составляющую, связанную с ВП:

$$\operatorname{Im} \Delta U_{\sim} = \frac{I_0}{I_{\infty}} \cdot \frac{\omega T_0 F_{\infty}}{1 + \omega^2 T_0^2} = I_0 R_{MN} \eta_{\infty} \frac{\omega T_0}{1 + \omega^2 T_0^2}. \quad (47)$$

Мнимая составляющая отличается от вещественной составляющей напряжения ВП множителем  $\omega T_0$ . Установившееся значение полного напряжения можно также представить в виде

$$\Delta U_{\sim} = A(\omega) \cos(\omega T - \varphi_{\text{вп}}), \quad (48)$$

где амплитуда напряжения

$$A(\omega) = \sqrt{(\operatorname{Re} \Delta U_{\sim})^2 + (\operatorname{Im} \Delta U_{\sim})^2}, \quad (49)$$

сдвиг фазы ВП, имеющий отрицательный знак,

$$\varphi_{\text{вп}} = \operatorname{arctg} \frac{\operatorname{Im} \Delta U_{\sim}}{\operatorname{Re} \Delta U_{\sim}}. \quad (50)$$

В рассматриваемом примере экспоненциальной переходной характеристики из формул (44)–(48) имеем

$$A(\omega) = I_0 R_{MN} \sqrt{1 + \frac{\eta_{\infty} (2 + \eta_{\infty})}{1 + \omega^2 T_0^2}}; \quad (51)$$

$$\operatorname{tg} \varphi_{\text{вп}} = \frac{\omega T_0 \eta_{\infty}}{1 + \eta_{\infty} + \omega^2 T_0^2}. \quad (52)$$

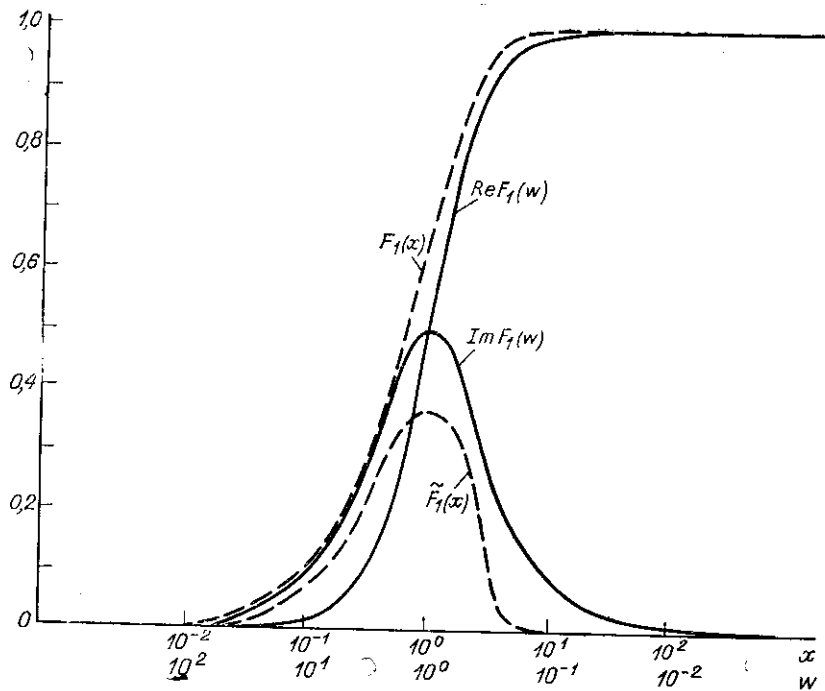


Рис. 34. Временная и частотная зависимости напряжения ВП  $F_1(x)$ , его производной по натуральному логарифму времени  $\tilde{F}_1(x)$ , вещественной  $\text{Re} F_1(\omega)$  и мнимой составляющих  $\text{Im} F_1(\omega)$  для экспоненциальной переходной характеристики ВП.

Предельная поляризуемость  $\eta_\infty$  расшифрована в формуле (40). Максимум  $\text{tg } \varphi_{\text{ВП}}$  имеет место при частоте

$$\omega_{\text{max}} = \frac{\sqrt{1+\eta_\infty}}{T_0} \xrightarrow{\eta_\infty \ll 1} \frac{1}{T_0}, \text{ тогда } \text{tg } \varphi_{\text{ВП}} = \frac{\eta_\infty}{2\sqrt{1+\eta_\infty}} \xrightarrow{\eta_\infty \ll 1} \frac{\eta_\infty}{2}.$$

Сопоставим далее свойства переходной характеристики, заданной формулой (43), и частотной характеристики вещественной составляющей напряжения ВП:

$$\text{Re } F_1(\omega) = 1/(1 + \omega^2 T_0^2), \quad (53)$$

а также производной переходной характеристики по логарифму времени

$$\tilde{F}_1(T) = dF_1/d \ln T = T F_1'(T) = e^{-T/T_0} (T/T_0) \quad (54)$$

и частотной характеристики мнимой составляющей напряжения ВП

$$\text{Im } F_1(\omega) = \omega T_0 / (1 + \omega^2 T_0^2). \quad (55)$$

На рис. 34 приведены графики этих функций при логарифмическом масштабе аргументов  $x = T/T_0$  и  $\omega = \omega/\omega_0$ . Сравнимые

пары графиков сходны между собой. Максимум  $\tilde{F}_1(x)$  наблюдается при  $x = 1$  ( $T = T_0$ ), тогда  $\tilde{F}_1(x) = 1/e = 1/2,71$ . Между тем максимум  $\text{Im } F_1(\omega)$  при  $\omega = 1/T_0$  равен  $1/2$ .

Заметим, кстати, что в комплексной форме частотная зависимость ВП, соответствующая экспоненциальной переходной характеристике, имеет простой вид:

$$F_1(\omega) = 1/(1 + i\omega T_0). \quad (56)$$

Переходная характеристика

$$F_2(T) = 1 - e^{QT} \text{erfc } \sqrt{QT}, \quad (57)$$

соответствующая выше рассмотренной формуле (24), имеет в качестве своего аналога частотную зависимость в комплексной форме

$$F_2(\omega) = \frac{1}{1 + \sqrt{i\omega/Q}}. \quad (58)$$

Производная переходной характеристики по логарифму времени

$$\tilde{F}_2(T) = \frac{dF_2(T)}{d \ln T} = \sqrt{\frac{QT}{\pi}} - QT e^{QT} \text{erfc } \sqrt{QT}. \quad (59)$$

Максимум ее наблюдается при  $T = (Q\sqrt{\pi})^{-1} = T_0$ . Тогда  $F_2(T) = 1/2$  и  $\tilde{F}_2 = 1/(2\sqrt{\pi})$ .

Примем  $T_0$  — аргумент максимума  $\tilde{F}_2$  — за постоянную времени процесса ВП, описываемого функцией (57), и за начало логарифмической шкалы времени, тогда  $Q = 1/(T_0 \sqrt{\pi})$ .

На переменном токе вещественная

$$\text{Re } F_2(\omega) = \frac{1 + \sqrt{\omega/(2\omega_0)}}{1 + \omega/\omega_0 + \sqrt{2\omega/\omega_0}} \quad (60)$$

и мнимая составляющие ВП

$$\text{Im } F_2(\omega) = \frac{\sqrt{\omega/(2\omega_0)}}{1 + \omega/\omega_0 + \sqrt{2\omega/\omega_0}}, \quad (61)$$

где  $\omega_0 = Q = (T_0 \sqrt{\pi})^{-1}$  — постоянная частоты, принимаемая за начало логарифмической шкалы частоты.

Обе составляющие ВП симметричны относительно точки с координатой  $\omega = \omega_0$ , тогда  $\text{Re } F_2(\omega) = 1/2$ ;  $\text{Im } F_2(\omega)$  достигает максимума, равного  $1/[2(1 + \sqrt{2})]$ .

Вещественная и мнимая составляющие ВП между собой связаны уравнением

$$\frac{d \text{Re } F_2(\omega)}{d \ln \omega} = \frac{1}{2} \text{Im } F_2(\omega) + [\text{Im } F_2(\omega)]^2, \quad (62)$$

из которого видно, что мнимая составляющая сопоставима с производной вещественной составляющей по логарифму частоты.

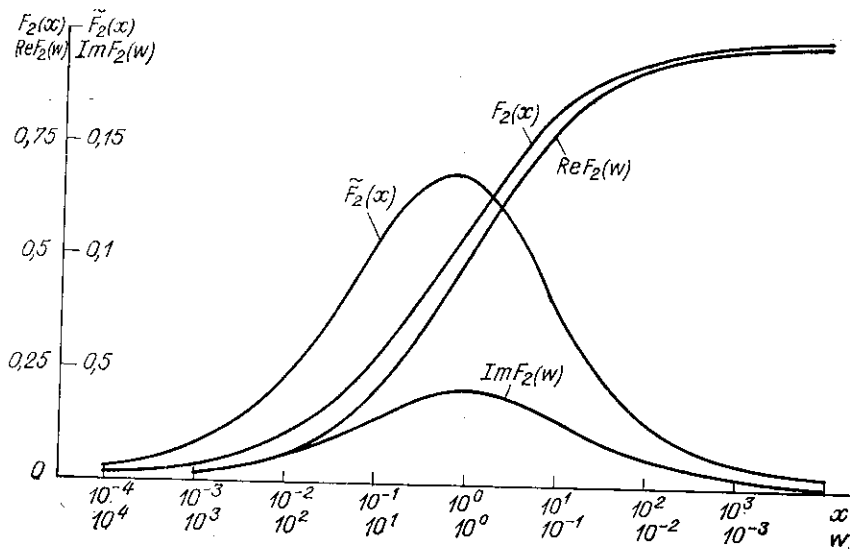


Рис. 35. Временная и частотная зависимости напряжения  $F_2(x)$ , его производной по натуральному логарифму времени  $\tilde{F}_2(x)$ , вещественной  $\text{Re}F_2(w)$  и мнимой составляющей  $\text{Im}F_2(w)$  для переходной характеристики ВП, выражаемой функцией интеграла вероятности.

Графики функций  $F_2(x)$ ,  $\tilde{F}_2(x)$ ,  $\text{Re}F_2(w)$  и  $\text{Im}F_2(w)$  приведены на рис. 35, а в табл. 18 указаны их значения.

Переходная характеристика  $F_2(x)$  и частотная зависимость вещественной составляющей практически совпадают между собой, если принять  $xw = T\omega = (\sqrt{\pi})^{-1}$ . При том же соотношении аргументов сходны  $\tilde{F}_2(x)$  и  $\text{Im}F_2(w)$ .

Таким образом, между временными и частотными характеристиками устанавливается однозначная связь, особенно ценная потому, что, как отмечено выше, функция (24) в значительной мере отражает экспериментальные закономерности ВП.

Большими аппроксимирующими возможностями обладает логарифмическая функция (23), соответственно которой переходную характеристику ВП можно представить в виде

$$F_3(T) = \frac{\ln[(g/h)(T+h)/(T+g)]}{\ln(g/h)} = \frac{\ln[(1+Bx)/(1+x/B)]}{\ln B^2}, \quad (63)$$

где  $B = \sqrt{g/h}$ ;  $x = T/T_0$ ;  $T_0 = \sqrt{gh}$ .

Ее производная по логарифму времени

$$\tilde{F}_3(T) = \frac{g-h}{\ln(g/h)} \cdot \frac{T}{(T+g)(T+h)} = \frac{x(B^2-1)}{(x+B)(Bx+1)\ln B^2}. \quad (64)$$

Временная функция  $F_3(x)$  и частотные зависимости вещественной и мнимой составляющих  $F_3(w)$  для установившегося режима

ТАБЛИЦА 18  
Временные и частотные коэффициенты ВП для функции интеграла вероятности

| $x; w$ | $F_2(x)$ | $\frac{dF_2(x)}{d \ln x}$ | $\text{Re}F_2(w)$ | $\text{Im}F_2(w)$ |
|--------|----------|---------------------------|-------------------|-------------------|
| 0,0001 | 0,01118  | 0,00555                   | 0,9929            | 0,0070            |
| 0,0002 | 0,01575  | 0,00778                   | 0,9900            | 0,0098            |
| 0,0005 | 0,02473  | 0,0121                    | 0,9842            | 0,0153            |
| 0,001  | 0,03470  | 0,0169                    | 0,9777            | 0,0213            |
| 0,002  | 0,04853  | 0,0233                    | 0,9684            | 0,0297            |
| 0,005  | 0,07503  | 0,0352                    | 0,9502            | 0,0452            |
| 0,01   | 0,10350  | 0,0476                    | 0,9299            | 0,0614            |
| 0,02   | 0,14150  | 0,0630                    | 0,9016            | 0,0820            |
| 0,05   | 0,2099   | 0,0866                    | 0,8477            | 0,1157            |
| 0,1    | 0,2764   | 0,1063                    | 0,7908            | 0,1445            |
| 0,2    | 0,3562   | 0,124                     | 0,7183            | 0,1726            |
| 0,5    | 0,4768   | 0,137                     | 0,6000            | 0,2000            |
| 1      | 0,5724   | 0,136                     | 0,5000            | 0,2071            |
| 2      | 0,6636   | 0,125                     | 0,4000            | 0,2000            |
| 5      | 0,7611   | 0,100                     | 0,2817            | 0,1726            |
| 10     | 0,8295   | 0,0758                    | 0,2092            | 0,1445            |
| 20     | 0,8768   | 0,0582                    | 0,1523            | 0,1157            |
| 50     | 0,9210   | 0,0387                    | 0,0984            | 0,0820            |
| 100    | 0,9439   | 0,0278                    | 0,0701            | 0,0614            |
| 200    | 0,9602   | 0,0198                    | 0,0498            | 0,0452            |
| 500    | 0,9748   | 0,0126                    | 0,0316            | 0,0297            |
| 1000   | 0,9822   | 0,0089                    | 0,0223            | 0,0213            |
| 2000   | 0,9874   | 0,0063                    | 0,0158            | 0,0153            |

$$F_2(x) = 1 - e^x \text{erfc} \sqrt{x}; \quad F_2(w) = 1/(1 + \sqrt{iw}).$$

переменного тока охарактеризованы в табл. 19. В этом случае интеграл Дюамеля дает следующие выражения составляющих:

$$\text{Re}F_3(w) = \frac{g-h}{\ln(g/h)} \int_0^\infty \frac{\cos \omega \tau}{(\tau+g)(\tau+h)} d\tau = \frac{B^2-1}{\ln B^2} \int_0^\infty \frac{\cos wz}{(x+B)(Bx+1)} dz, \quad (65)$$

$$\text{Im}F_3(w) = \frac{g-h}{\ln(g/h)} \int_0^\infty \frac{\sin \omega \tau}{(\tau+g)(\tau+h)} d\tau = \frac{B^2-1}{\ln B^2} \int_0^\infty \frac{\sin wz}{(x+B)(Bx+1)} dz, \quad (66)$$

где безразмерный аргумент  $w = \omega T_0$ ;  $\omega$  — угловая частота;  $T_0$  — время максимума производной переходной характеристики по логарифму времени.

Вычисления интеграла Дюамеля приводят к довольно сложным выражениям  $F_3(w)$  через интегральные синусы и косинусы, которые описаны ранее [133]. Результаты вычислений получил К. А. Ермохин с помощью ЭВМ М-222.

ТАБЛИ  
Временные и частотные коэффициенты ВП  
 $F_s(x) = \frac{1}{2 \ln B}$

| $x; w$   | $B = 1,01$ |                     |                     | $F_s(x)$ |
|----------|------------|---------------------|---------------------|----------|
|          | $F_s(x)$   | $\text{Re } F_s(w)$ | $\text{Im } F_s(w)$ |          |
| 0,001    | 0,0010     | 0,9984              | 0,0063              | 0,0015   |
| 0,002    | 0,0020     | 0,9969              | 0,0113              | 0,0030   |
| 0,005    | 0,0050     | 0,9223              | 0,0236              | 0,0074   |
| 0,01     | 0,0099     | 0,9848              | 0,0404              | 0,0146   |
| 0,02     | 0,0196     | 0,9703              | 0,0673              | 0,0282   |
| 0,05     | 0,0477     | 0,9301              | 0,1246              | 0,0661   |
| 0,1      | 0,0905     | 0,8709              | 0,1866              | 0,1197   |
| 0,2      | 0,1653     | 0,7726              | 0,2588              | 0,2026   |
| 0,5      | 0,3357     | 0,5697              | 0,3363              | 0,3594   |
| 1        | 0,5000     | 0,3786              | 0,3434              | 0,4999   |
| 2        | 0,6492     | 0,2020              | 0,2891              | 0,6401   |
| 4        | 0,7975     | 0,0908              | 0,1991              | 0,7632   |
| 5        | 0,8333     | 0,0593              | 0,1695              | 0,7968   |
| 10       | 0,8965     | 0,0181              | 0,0949              | 0,8802   |
| 20       | 0,9457     | 0,0049              | 0,0493              | 0,9338   |
| 50       | 0,9854     | 0,0008              | 0,0200              | 0,9716   |
| $B = 50$ |            |                     |                     |          |
| 0,001    | 0,0062     | 0,9906              | 0,0221              | 0,0103   |
| 0,002    | 0,0122     | 0,9820              | 0,0357              | 0,0262   |
| 0,005    | 0,0285     | 0,9595              | 0,0630              | 0,0440   |
| 0,01     | 0,0518     | 0,9289              | 0,0906              | 0,0753   |
| 0,02     | 0,0886     | 0,8824              | 0,1209              | 0,1193   |
| 0,05     | 0,1599     | 0,7959              | 0,1567              | 0,1945   |
| 0,1      | 0,2288     | 0,7166              | 0,1750              | 0,2602   |
| 0,2      | 0,3060     | 0,6315              | 0,1852              | 0,3303   |
| 0,5      | 0,4151     | 0,5166              | 0,1892              | 0,4264   |
| 1        | 0,5000     | 0,4301              | 0,1871              | 0,5000   |
| 2        | 0,5849     | 0,3452              | 0,1807              | 0,5737   |
| 4        | 0,6680     | 0,2637              | 0,1694              | 0,6465   |
| 5        | 0,6940     | 0,2385              | 0,1645              | 0,6697   |
| 10       | 0,7713     | 0,1654              | 0,1450              | 0,7398   |
| 20       | 0,8400     | 0,1030              | 0,1193              | 0,8055   |
| 50       | 0,9115     | 0,0439              | 0,0794              | 0,8808   |

ЦА 19  
для логарифмической функции  
 $\ln \frac{1 + xB}{1 + x/B}$

| $B = 5$             |                     | $B = 10$ |                     |                     |
|---------------------|---------------------|----------|---------------------|---------------------|
| $\text{Re } F_s(w)$ | $\text{Im } F_s(w)$ | $F_s(x)$ | $\text{Re } F_s(w)$ | $\text{Im } F_s(w)$ |
| 0,9977              | 0,0083              | 0,0019   | 0,9967              | 0,0107              |
| 0,9954              | 0,0146              | 0,0041   | 0,9935              | 0,0185              |
| 0,9887              | 0,0298              | 0,0104   | 0,9842              | 0,0367              |
| 0,9781              | 0,0496              | 0,0205   | 0,9698              | 0,0592              |
| 0,9582              | 0,0795              | 0,0392   | 0,9439              | 0,0913              |
| 0,9063              | 0,1379              | 0,0869   | 0,8808              | 0,1480              |
| 0,8365              | 0,1936              | 0,1483   | 0,8034              | 0,1952              |
| 0,7325              | 0,2493              | 0,2342   | 0,6994              | 0,2356              |
| 0,5472              | 0,2962              | 0,3785   | 0,5338              | 0,2627              |
| 0,3914              | 0,2947              | 0,5000   | 0,4032              | 0,2590              |
| 0,2475              | 0,2597              | 0,6215   | 0,2804              | 0,2361              |
| 0,1343              | 0,2016              | 0,7333   | 0,1749              | 0,1974              |
| 0,1062              | 0,1807              | 0,7657   | 0,1460              | 0,1825              |
| 0,0448              | 0,1178              | 0,8517   | 0,0745              | 0,1328              |
| 0,0151              | 0,0678              | 0,9130   | 0,0314              | 0,0856              |
| 0,0029              | 0,0293              | 0,9608   | 0,0074              | 0,0404              |
| $B = 99,99$         |                     |          |                     |                     |
| 0,9847              | 0,0304              |          |                     |                     |
| 0,9716              | 0,0471              |          |                     |                     |
| 0,9396              | 0,0771              |          |                     |                     |
| 0,9001              | 0,1030              |          |                     |                     |
| 0,8464              | 0,1270              |          |                     |                     |
| 0,7590              | 0,1497              |          |                     |                     |
| 0,6865              | 0,1591              |          |                     |                     |
| 0,6121              | 0,1637              |          |                     |                     |
| 0,5134              | 0,1653              |          |                     |                     |
| 0,4390              | 0,1640              |          |                     |                     |
| 0,3654              | 0,1606              |          |                     |                     |
| 0,2933              | 0,1543              |          |                     |                     |
| 0,2706              | 0,1516              |          |                     |                     |
| 0,2026              | 0,1401              |          |                     |                     |
| 0,1405              | 0,1234              |          |                     |                     |
| 0,0730              | 0,0934              |          |                     |                     |

Временные и частотные зависимости  $F_3$  показаны на рис. 36. Временная характеристика сходна с частотной зависимостью вещественной составляющей, а производная  $\tilde{F}_3(x)$  — с мнимой составляющей, если  $x\omega = T\omega \approx 0,7$ . При детальном анализе можно заметить, что с увеличением параметра  $B$  от 1,01 до 100 аргумент максимума  $\text{Im } F_3$  уменьшается от  $\omega_0 = 0,8$  до  $\omega_0 = 0,6$ , между тем как максимум производной временной функции всегда

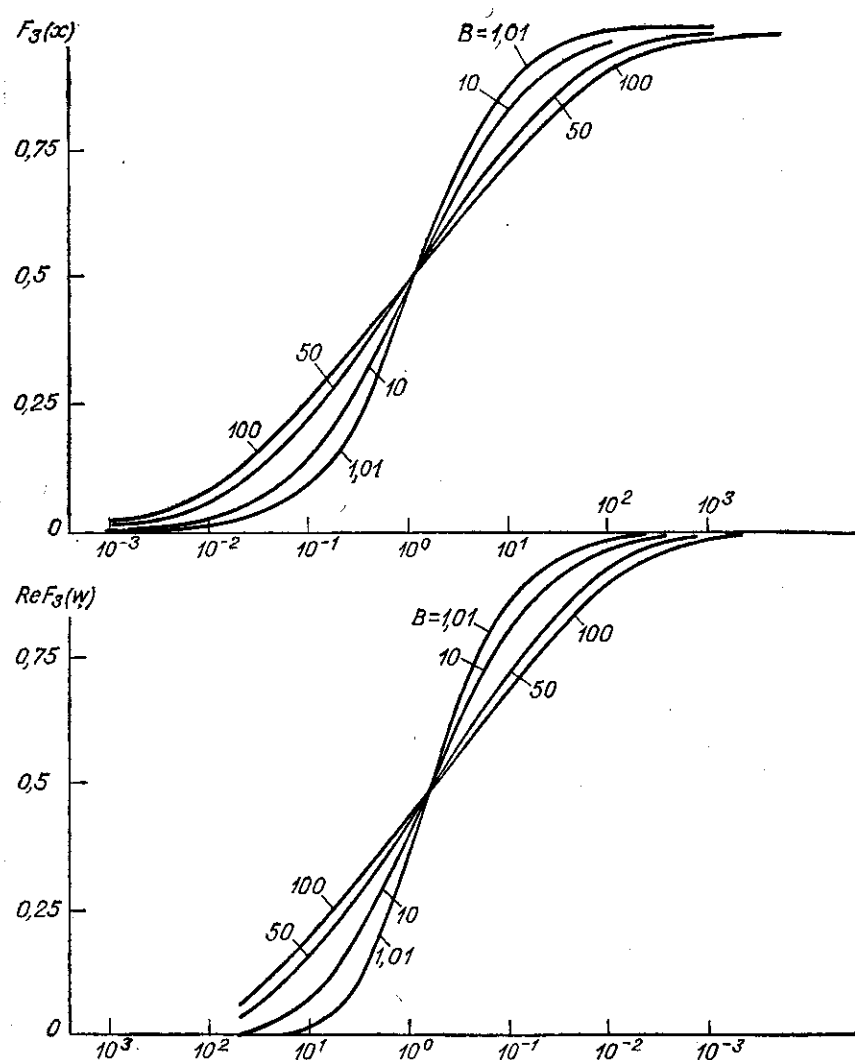
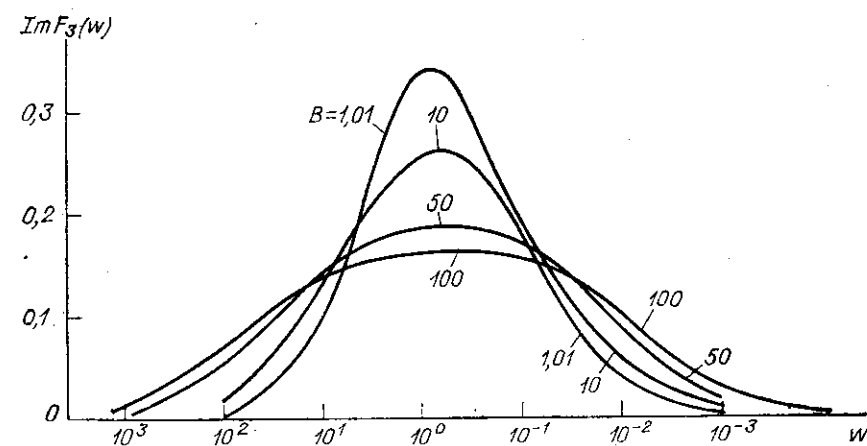
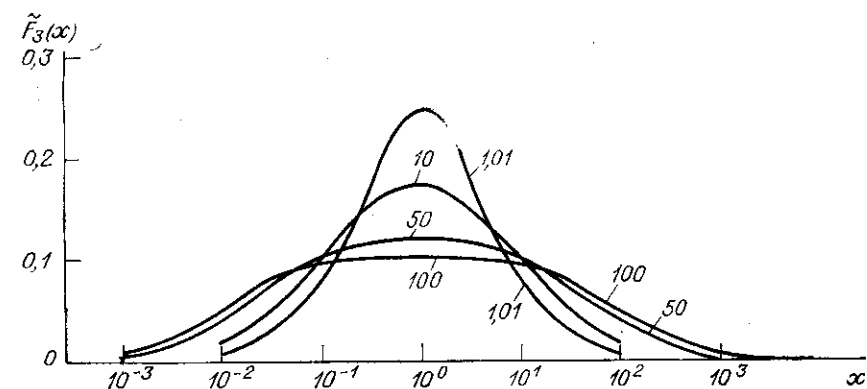


Рис. 36. Временная и частотная зависимости напряжения  $F_3(x)$ , его производной  $\tilde{F}_3(x)$  и мнимой  $\text{Im } F_3(w)$  составляющих для переходной характеристики

имеет аргумент  $x_0 = T/T_0 = 1$ . График производной строго симметричен относительно своего максимума. График мнимой составляющей немного асимметричен: правая ветвь чуть круче левой. Но имеет ли это практическое значение, сказать трудно.

Практически  $B \geq 10$  и на переходной характеристике имеется значительный линейный участок, если аргументом служит логарифм времени. Поэтому при анализе экспериментальных данных постоянные времени  $g$  и  $h$  проще всего определять как координаты времени точек пересечения прямой, аппроксимирующей переходную характеристику в области ее наибольшего наклона, с горизонтальными линиями, соответствующими стационарным



ной по натуральному логарифму времени  $\tilde{F}_3(x)$ , вещественной  $\text{Re } F_3(w)$  и ВП, выражаемой логарифмической функцией.

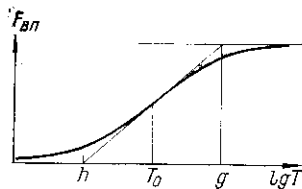


Рис. 37. Графическое определение параметров  $g$  и  $h$  по переходной характеристике ВП, построенной в логарифмическом масштабе времени.

(асимптотическим) значениям напряжения ВП в начале и в конце переходного процесса (рис. 37).

Совокупностью трех рассмотренных видов временных и частотных зависимостей можно отображать раннюю и позднюю стадии ВП. Установленные общие черты взаимоотношений этих зависимостей имеют универсальный характер. Определение параметров  $T_0$  и  $\omega_0$  сводится к отысканию аргументов максимумов  $dF(T)/d \ln T$ ,  $dF(\omega)/d \ln \omega$  или  $\lg \varphi_{ВП}$ . Параметры связаны соотношением:  $T_0 \omega_0 = N$ , где  $N_1 = 1$  для экспоненциального временного закона;  $N_2 = (\sqrt{\pi})^{-1} = 0,565$  для функции интеграла вероятности;  $N_3 \approx 0,7$  для логарифмического закона.

Одиноким и относительно узким максимумом соответствуют одному процессу ВП в простом теле. Чаще всего приходится иметь дело с суммарным эффектом ВП нескольких тел, имеющих разные значения параметров. Тогда анализ экспериментальных данных практически ограничивается установлением формы временной  $dF(T)/d \ln T$  или частотной зависимости  $F_{ВП}$ .

Напряжение ВП  
в случае импульса тока  
произвольной формы

Импульсы тока любой формы можно разбить на трапеции, которые представляют собой сумму прямоугольников и треугольников.

Рассмотрим роль формы тока на примере логарифмической временной зависимости [47]. Спад ВП после прямоугольного импульса описан в формуле (23), переходная характеристика — в формуле (63).

Входящая в уравнение Дюамеля (38) производная переходного сопротивления по времени

$$\frac{dR^*(\tau)}{d\tau} = R_{MN} \eta_{\infty} \frac{1}{\ln(g/h)} \left[ \frac{1}{\tau+h} - \frac{1}{\tau+g} \right], \quad (67)$$

где  $\tau$  — переменная интегрирования, равная промежутку времени между рассматриваемым и предшествующим моментами времени.

Зададим ток в виде треугольника с прямым углом в конце импульса (рис. 38). Во время импульса

$$I(T) = I_0 T/t_s, \quad (68)$$

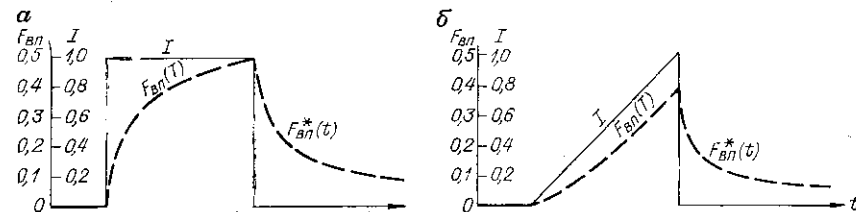


Рис. 38. Рост и спад напряжения ВП при прямоугольной (а) и треугольной (б) форме токового импульса.

где  $T$  — время, отсчитанное от момента включения тока;  $I_0$  — ток в вершине треугольника, т. е. в конце импульса.

Тогда интеграл Дюамеля приобретает вид

$$\Delta U = \Delta U_0 \frac{T}{t_s} + \frac{H}{t_s} \int_0^T \left( \frac{T-\tau}{\tau+h} - \frac{T-\tau}{\tau+g} \right) d\tau, \quad (69)$$

где  $\Delta U_0 = I_0 R_{MN}$  — омическое напряжение в конце импульса;  $H = \eta_{\infty} \Delta U_0 / \ln(g/h)$  — предельное напряжение ВП.

После интегрирования получаем, что во время пропускания тока

$$\Delta U = \Delta U_0 \frac{T}{t_s} + H \left[ \frac{T}{t_s} \ln \frac{g(T+h)}{h(T+g)} - \frac{g}{t_s} \ln \frac{T+g}{g} + \frac{h}{t_s} \ln \frac{T+h}{h} \right]. \quad (70)$$

Если бы импульс имел прямоугольную форму и ток равнялся  $I_0$ , то во время пропускания тока

$$\Delta U = \Delta U_0 + H \ln \frac{g(T+h)}{h(T+g)}. \quad (71)$$

Разность напряжений, описываемых формулами (71) и (70), в силу закона суперпозиции линейных процессов дает напряжение в случае треугольного импульса с прямым углом в начале его:

$$\Delta U = \Delta U_0 \left( 1 - \frac{T}{t_s} \right) + H \left[ \left( 1 - \frac{T}{t_s} \right) \ln \frac{g(T+h)}{h(T+g)} + \frac{g}{t_s} \ln \frac{T+g}{g} - \frac{h}{t_s} \ln \frac{T+h}{h} \right]. \quad (72)$$

Для вычислений напряжения ВП после выключения тока воспользуемся формулой (29) и представим выключение тока как дополнительное включение прямоугольного и треугольного токов, образующих трапецию, компенсирующую продолжающееся

действие треугольного тока, включенного в момент  $T = 0$ . В итоге для треугольного импульса, показанного на рис. 38, получим

$$E_{\text{ВП}}^*(t) = \Delta U_{\text{ВП}} = H \left[ \frac{t+t_3}{t_3} \ln \frac{(t+g)(t+t_3+h)}{(t+h)(t+t_3+g)} - \frac{g}{t_3} \ln \frac{t+t_3+g}{t+g} + \frac{h}{t_3} \ln \frac{t+t_3+h}{t+h} \right]. \quad (73)$$

Если в формуле (73)  $t = 0$  и  $t_3 = T$ , то вернемся к формуле (70).

Спад напряжения ВП после треугольного импульса с вершиной в начале его нетрудно вычислить как разность спада напряжений ВП для прямоугольного импульса и треугольного, описанного формулой (73).

## ВЫВОДЫ

1. Важнейшая особенность ВП заключается в том, что для ее полного установления и исчезновения требуется длительное время. При длительности зарядки в несколько минут спад ВП наблюдается обычно в течение 5—30 мин, что в тысячи раз превышает время электродинамических переходных процессов в тех же условиях. При весьма длительной зарядке (30—60 мин) удается создать поле ВП, практически заметное спустя 1 ч и более после выключения тока. Эти данные — свидетельство электрохимической природы ВП.

2. Скорость роста ВП в процессе зарядки и спада ВП после выключения тока практически одна и та же в лабораторных и полевых условиях. Относительно невелико изменение временных характеристик ВП в зависимости от разности электродов, электропроводности среды и прочих факторов, предопределяющих время проявления электродинамических процессов. Эта особенность ВП — свидетельство того, что источниками поля ВП служат процессы в небольших объемах горных пород и электрохимические свойства этих объемов обуславливают временные зависимости макротока ВП.

3. Между ВП электронных и ионных проводников нет принципиальной разницы во взаимоотношении эффектов ВП во время зарядки и разрядки. Во всех случаях действует единая эквивалентная электрическая схема, в которой объемно поляризованная среда представлена в виде множества последовательно включенных и чередующихся между собой омических сопротивлений и меняющихся со временем э. д. с. ВП, создающих ток, противоположный поляризующему.

4. В том диапазоне относительно малых плотностей поляризующего тока, который соответствует обычным условиям полевых работ, процессы ВП линейны по отношению к току.

В роли основного выразителя временных свойств ВП выступает переходная характеристика ВП, под которой понимается кривая роста напряжения ВП при одиночном ступенчатом включении постоянного тока. Она может быть непосредственно измерена во время пропускания постоянного тока через поляризуемый объект. При изучении линейной составляющей ВП переходную характеристику можно также строить по результатам наблюдения спадающего напряжения ВП после выключения тока, которое является по отношению к переходной характеристике конечной разностью функции при приращении аргумента—времени, равному длительности импульса тока.

Пользуясь принципом суперпозиции, можно любой набор импульсов тока разложить на комбинацию ступенек тока и по заданной переходной характеристике определить поведение линейной ВП.

5. Изменения амплитуды и фазы напряжения на измерительных электродах, обнаруживаемые при измерениях на переменном токе, имеют строгое количественное соотношение с эффектами ВП, изучаемыми на постоянном токе. Влияние ВП выражается в уменьшении амплитуды напряжения с ростом частоты

и в запаздывании фазы напряжения относительно фазы тока в токовой линии, между тем как для индукционных процессов характерно увеличение амплитуды и опережение фазы. Эффекты ВП подобны емкостным процессам с весьма большой постоянной времени.

Измерения на постоянном и переменном токе сопоставимы между собой, если исследованному диапазону времени от  $T_1$  до  $T_2$  отвечает диапазон угловых частот от  $\omega_1 = 1/T_1$  до  $\omega_2 = 1/T_2$ . Тогда кажущиеся поляризуемости в обоих вариантах примерно равны друг другу, а сдвиг фазы ВП сопоставим с производной напряжения ВП по логарифму времени.

6. В качестве основного временного параметра ВП предлагается использовать абсциссу максимума производной переходной характеристики ВП по логарифму времени. Этот параметр непосредственно графическим путем определяется из экспериментальных переходных характеристик, построенных в логарифмическом масштабе времени, и не зависит от аналитического вида аппроксимирующей теоретической функции. Параметр меняется от миллисекунд для рыхлых осадочных пород до сотен секунд для прожилково-вкрапленных руд.

Аналогичным частотным параметром является частота максимума сдвига фазы ВП.

В сложных условиях одновременного проявления поляризации тел, имеющих различные временные и частотные параметры, в основу интерпретации следует брать анализ формы зависимостей производной ВП или сдвига фазы от логарифма времени или частоты.

## ТЕОРЕТИЧЕСКИЕ РАСЧЕТЫ И МОДЕЛИРОВАНИЕ ПОЛЕЙ ВП

В процессе работ по методу ВП измеряют силу тока в токовой линии  $I$ , разность потенциалов между измерительными электродами во время пропускания тока  $\Delta U$  и после его выключения  $\Delta U_{\text{ВП}}$ . По этим данным вычисляют кажущуюся поляризуемость

$$\eta_k = \Delta U_{\text{ВП}} / \Delta U, \quad (74)$$

которую обычно выражают в процентах, и кажущееся удельное сопротивление

$$\rho_k = K \Delta U / I, \quad (75)$$

выражаемое в ом-метрах;  $K$  — коэффициент установки, имеющий размерность длины.

Кроме того, в последние годы все более широко изучают временную зависимость  $\eta_k$  и используют нелинейные свойства ВП.

Цель работ заключается в определении на заданной поисковой территории аномалий поляризуемости и их увязке с геологическим строением. Выделение аномалий основано на предварительном знании нормального поведения кажущейся поляризуемости, с которым сравнивают полученные значения. Интерпретация аномалий кажущейся поляризуемости состоит из:

- 1) определения геометрического образа источника аномалии, т. е. установления его положения в пространстве, размера и формы;
- 2) определения поляризуемости и электропроводности источника аномалии.

Сопоставление аномалий  $\eta_k$  и  $\rho_k$  дает дополнительную информацию об электропроводности. Временные зависимости ВП характеризуют текстуру поляризуемого тела (размер, форму, ориентировку электропроводящих включений), а нелинейные свойства, выражаемые через различие анодных и катодных процессов ВП, — его минеральный состав.

Ниже рассмотрены нормальное поле ВП в однородных по поляризуемости средах и аномальные поля ВП, создаваемые простыми по форме телами: сферическими, сфероидальными и пластообразными, с которыми в определенном приближении можно сопоставлять геологические тела.

## ОБЩИЕ ПОЛОЖЕНИЯ. ПОЛЕ ВП В ОДНОРОДНЫХ СРЕДАХ

Исходные уравнения

Согласно уравнению (2), при постоянной силе тока и неизменном омическом сопротивлении

среды рост  $\Delta U$  во время зарядки в полной мере отражает поведение  $\Delta U_{\text{ВП}}$  в то же время. Выключение тока вызывает немедленное \* исчезновение разности потенциалов токового поля

$$\Delta U_0 = IR_{MN}, \quad (76)$$

замыкающегося через токовую линию. В этот момент  $\Delta U_{\text{ВП}}$  равна той, что существовала в конце зарядки. Затем происходит спад ВП, закономерности которого описаны ранее. В любой фиксированный момент времени рассматриваемые линейные составляющие  $\Delta U_{\text{ВП}}$  и  $\Delta U$  пропорциональны силе поляризующего тока [уравнение (4)].

Уравнение (27) учитывает наличие в среде вторичных электродвижущих сил, порождаемых электрическим током. Эти силы распределяются по поверхности контакта электропроводящего тела с ионопроводящей вмещающей средой. При рассмотрении поля ВП отдельно такого тела поляризации является поверхностной. Суммарный эффект ВП многочисленных электропроводящих включений, распределенных в некотором объеме пород, так же как поляризация ионопроводящих пород, рассматривается как объемная поляризация.

Переходя к дифференциальной форме закона Ома, взамен уравнения (27) получаем векторные соотношения

$$\mathbf{E} = \mathbf{J}\rho + \mathbf{E}_{\text{ВП}}^* = \mathbf{E}_0 + \mathbf{E}_{\text{ВП}}, \quad (77)$$

где  $\mathbf{E}$  — напряженность поляризующего поля, под которым понимается суммарное поле, действующее во время зарядки;  $\mathbf{J}$  — плотность тока;  $\mathbf{E}_0$  — напряженность первичного (токового) поля;  $\mathbf{E}_{\text{ВП}}$  — напряженность полного поля ВП;  $\rho$  — удельное сопротивление среды;  $\mathbf{E}_{\text{ВП}}^*$  — напряженность поля ВП, обусловленная носителями э. д. с. ВП, которые находятся в «точке» наблюдения, т. е. на участке среды между измерительными электродами.

\* Электродинамические переходные процессы принимаются бесконечно быстрыми и затухающими в масштабе рассматриваемых интервалов времени. Влияния этих процессов на ВП можно учесть путем вычислений интеграла Дюамеля, если входным сигналом задать напряжение устанавливающегося электрического поля, а переходной характеристикой — исследованное в предыдущем разделе напряжение ВП.

При объемной поляризации среды

$$E_{\text{ВП}}^* = -4\pi P_{\text{ВП}}, \quad (78)$$

где  $P_{\text{ВП}}$  — дипольный момент ВП единицы объема в рассматриваемой точке.

При поверхностной поляризации  $E_{\text{ВП}}^* = 0$  во всех точках, расположенных вне поверхности электронного проводника. Плотность тока в общем случае неоднородной среды имеет две составляющие, обусловленные внешним источником поляризующего тока  $J_0$  и поляризацией среды вне рассматриваемой точки  $J_{\text{ВП}}$ :

$$J = J_0 + J_{\text{ВП}}. \quad (79)$$

Первая составляющая исчезает одновременно с выключением поляризующего тока, вторая существует и после его выключения, если для э. д. с. ВП имеется внешняя разрядная цепь. Такой цепью для поляризованного тела служит вмещающая среда. Однородная по поляризуемости среда замыкается через токовую линию. Если эта линия разомкнута, то  $J_{\text{ВП}} = 0$ . Если же токовую линию после отключения источника тока оставить замкнутой, то ток ВП обнаруживается и в однородной среде [см. уравнение (27)].

При принятом условии постоянства поляризующего тока значение

$$E_0 = J_0 \rho \quad (80)$$

во время зарядки постоянно и равно первичному токовому полю в начальный момент зарядки, когда эффектами ВП можно пренебречь.

Вычисления токового поля в неполяризуемых средах составляют предмет теории электроразведки постоянным током [36, 82, 160, 320] и выполнены для многих вариантов электропрофилирования и вертикального электрического зондирования. Вычисления полей ВП можно свести к расчетам поляризующего поля с достаточно точным учетом поляризационных свойств сред и к последующим вычислениям разности поляризующего и первичного полей, поскольку

$$E_{\text{ВП}} = E - E_0. \quad (81)$$

Соответственно потенциал поля ВП

$$U_{\text{ВП}} = U - U_0, \quad (82)$$

где  $U$  и  $U_0$  — потенциалы поляризующего и первичного полей.

В применении к решаемой квазистатической задаче, потенциал поляризующего поля, как и потенциал первичного поля, удовлетворяет уравнению Лапласа

$$\nabla^2 U = 0. \quad (83)$$

Для решения этого уравнения можно использовать те же способы, что при вычислениях первичного поля, но при усложненных граничных условиях.

| Граничные условия | Первичное поле                                                                                    | Поляризующее поле                                                                                 |                                                                                                                                    |
|-------------------|---------------------------------------------------------------------------------------------------|---------------------------------------------------------------------------------------------------|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
|                   |                                                                                                   | Поверхностная поляризация                                                                         | Объемная поляризация                                                                                                               |
| Первое            | $U_0^{(1)} - U_0^{(2)} = 0$                                                                       | $U^{(1)} - U^{(2)} = \lambda \frac{\partial U^{(1)}}{\partial \nu}$                               | $U^{(1)} - U^{(2)} = 0$                                                                                                            |
| Второе            | $\sigma_1 \frac{\partial U^{(1)}}{\partial \nu} = \sigma_2 \frac{\partial U^{(2)}}{\partial \nu}$ | $\sigma_1 \frac{\partial U^{(1)}}{\partial \nu} = \sigma_2 \frac{\partial U^{(2)}}{\partial \nu}$ | $\sigma_1 (1 - \eta_1) \frac{\partial U^{(1)}}{\partial \nu} =$<br>$= \sigma_2 (1 - \eta_2) \frac{\partial U^{(2)}}{\partial \nu}$ |

Для поверхностной поляризации индекс (1) соответствует электролиту (вмещающей среде), индекс (2) — электронному проводнику. Первое граничное условие обосновано экспериментальными данными, отраженными в формулах (3) и (4). Для объемной поляризации второе граничное условие обосновано общей теорией электрических полей [36, 277, 278] и приведенными формулами (77) и (78), согласно которым вектор плотности тока должен удовлетворять уравнению

$$J = \sigma (E + 4\pi P_{\text{ВП}}), \quad (84)$$

где  $\sigma$  — электропроводность среды ( $\sigma = 1/\rho$ ).

Остальные условия те же, что для первичного поля.

Линейность поляризации по отношению к току дает основание принять

$$P_{\text{ВП}} = -cE, \quad (85)$$

где коэффициент пропорциональности  $c$  — поляризационная восприимчивость среды, аналогичная магнитной восприимчивости в теории магнитного поля.

Из уравнений (84) и (85) следует, что в каждой объемно поляризованной среде

$$J = \sigma (1 - 4\pi c) E = \sigma (1 - \eta) E, \quad (86)$$

где  $\eta = 4\pi c$ .

Условие непрерывности нормальной составляющей вектора плотности тока при объемной поляризации означает, что на границе сред

$$\sigma_1 (1 - \eta_1) E_{\nu}^{(1)} = \sigma_2 (1 - \eta_2) E_{\nu}^{(2)}, \quad (87)$$

где  $E_{\nu}^{(1)} = -\partial U^{(1)}/\partial \nu$ ;  $E_{\nu}^{(2)} = -\partial U^{(2)}/\partial \nu$ .

Величине  $\sigma (1 - \eta)$  можно приписать смысл фиктивной электропроводности  $\sigma^*$ . Тогда второе граничное условие и окончательные выражения поляризующего поля совпадут с описывающими первичное поле. Таким образом, нахождение поляризующего поля в условиях объемной поляризации сред сводится к замене в выражении первичного поля электропроводности каждой из сред  $\sigma_i$

на фиктивную электропроводность  $\sigma_i^*$ , учитывающую поляризуемость,

$$\sigma_i^* = \sigma_i (1 - \eta_i). \quad (88)$$

Затем достаточно воспользоваться формулами (81) и (82), чтобы найти напряженность или потенциал поля ВП. Этот простой и эффективный способ расчета полей ВП, создаваемых объемно поляризованными телами при любой их электропроводности, автор разработал и применил в конце 50-х годов [124]. Аналогичный способ в 1959 г. опубликовал канадский геофизик Г. Сигел [404]. До тех пор поля ВП вычисляли с помощью интегралов, как в теории магниторазведки, задавая поляризационную восприимчивость тел и пренебрегая различием электропроводности тел и вмещающей среды [88, 126, 338, 361].

Способ решения задач о поверхностной поляризации с вышеуказанными граничными условиями впервые в 1956 г. опубликовал Ю. П. Булашевич [34], решивший задачу о поляризации сферы, помещенной в однородное токовое поле \*, и использовавший полученное решение для оценки объемной поляризации среды, заполненной электропроводящими сферическими включениями.

Интегральные способы удобны при использовании ЭВМ. Если электронный проводник имеет форму тонкого листа и расположен вдоль эквипотенциальной поверхности первичного поля, так что не искажает структуры токового поля, то потенциал ВП можно вычислить по формуле для двойного электрического слоя [278]

$$U_{ВП} = \int_S \tau d\Omega, \quad (89)$$

где  $d\Omega$  — элемент телесного угла, под которым видна поверхность листа  $S$  из точки наблюдения;  $\tau$  — дипольный момент единицы поверхности (мощность двойного слоя), который связан с контактной э. д. с. ВП простым соотношением

$$\tau = [(1/4\pi)] \mathcal{E}_{ВП}. \quad (90)$$

Значение  $\mathcal{E}_{ВП}$  можно вычислить по формуле (11), если знать напряженность поляризуемого поля и коэффициент  $\lambda$ .

В случае объемной поляризации, если электропроводность тела и вмещающей среды принять одинаковой, расчет можно вести, как в теории электростатики [36, 160] и магниторазведки [180, 321], с помощью интеграла

$$U_{ВП} = \int_V \frac{(\mathbf{P}_{ВП} \mathbf{R})}{R^3} dV, \quad (91)$$

где  $V$  — объем поляризованного тела;  $R$  — расстояние от элемента объема  $dV$  до точки наблюдения.

\* Та же задача И. И. Рокитянским самостоятельно решена в 1955 г. (кандидатская диссертация, 1957).

Момент ВП единицы объема  $\mathbf{P}_{ВП}$  связан формулой (85) с поляризующим полем  $\mathbf{E}$ , поэтому

$$U_{ВП} = \frac{\eta}{4\pi} \int_V \frac{(\mathbf{E} \mathbf{R})}{R^3} dV, \quad (92)$$

где  $\eta = 4\pi\epsilon$  — поляризуемость тела, считаемая внутри тела постоянной.

Поле ВП внутри тела пропорционально вектору  $\mathbf{P}_{ВП}$ :

$$\mathbf{E}_{ВП} = -N \mathbf{P}_{ВП}, \quad (93)$$

где  $N$  — параметр «формы» тела, равный коэффициенту размагничивания [321].

Соответственно формулам (77), (78) и (93), поляризующее поле внутри тела

$$\mathbf{E} = \frac{\mathbf{E}_0}{1 - \eta N / (4\pi)} \quad (94)$$

и при принятом условии постоянства первичного поля  $\mathbf{E}$  возрастает со временем за счет ВП.

Коэффициент  $N = 4\pi$  в однородной среде. Для сферы  $N = 4\pi/3$ . В любом случае  $N \leq 4\pi$ , поэтому при небольшой поляризуемости поляризующее поле в формуле (92) можно заменить первичным. Совершаемая при этом относительная погрешность, очевидно, не больше значения поляризуемости.

Если в качестве  $\eta$  использовать избыточную поляризуемость тела, то формула (92) даст значение аномального потенциала ВП. Интеграл (92) можно использовать и для решения задач метода сопротивлений. Для этого, принимая во внимание аналогию задач электростатики и поля постоянного тока [160], надо в формулах (92) и (94) заменить  $\eta$  на  $(\sigma_1 - \sigma_2)/\sigma_1$ , где  $\sigma_2$  — электропроводность тела;  $\sigma_1$  — электропроводность вмещающей среды.

От задачи метода сопротивлений с помощью эффективной электрической проводимости нетрудно перейти к вычислению электрического поля в поляризуемой среде. Учитывая формулу (88), для объемно поляризованного тела, электропроводность которого отличается от электропроводности вмещающей среды, получаем взамен формулы (92) аномальный потенциал

$$U_{ВП} = \left( \frac{\sigma_1^* - \sigma_2^*}{4\pi\sigma_1^*} - \frac{\sigma_1 - \sigma_2}{4\pi\sigma_1} \right) \int_V \frac{(\mathbf{E} \mathbf{R})}{R^3} dV, \quad (95)$$

где  $\sigma_1^* = \sigma_1 (1 - \eta_1)$ ;  $\sigma_2^* = \sigma_2 (1 - \eta_2)$ ;  $\eta_2$  и  $\eta_1$  — поляризуемость тела и вмещающей среды.

Поляризующее поле  $\mathbf{E}$  содержит искомое поле ВП, поэтому уравнения (92) и (93) являются интегро-дифференциальными и решаются методом последовательных приближений [274]. В этих уравнениях тройной интеграл можно преобразовать в двойной.

Для этого подынтегральное выражение представим как скалярное произведение двух векторов, выражающих градиенты потенциалов:

$$\frac{(\mathbf{E}\mathbf{R})}{R^3} = \left( \nabla U \nabla \frac{1}{R} \right), \quad (96)$$

где  $\nabla U = -\mathbf{E}$ ;  $\nabla (1/R) = \mathbf{R}/R^3$ .

Затем воспользуемся известным преобразованием Грина и получим

$$\int \left( \nabla U \nabla \frac{1}{R} \right) dV = \int_S \frac{1}{R} \cdot \frac{\partial U}{\partial \nu} dS - \int \frac{1}{R} \nabla^2 U dV, \quad (97)$$

где  $S$  — поверхность, ограничивающая объем  $V$ ;  $\nu$  — внешняя нормаль к поверхности.

Поляризующее поле удовлетворяет уравнению Лапласа (83), поэтому объемный интеграл в правой части формулы (95) равен нулю и задача сводится к вычислению поверхностного интеграла. В итоге, например, взамен формулы (92) имеем

$$U_{\text{ВП}} = \frac{\eta}{4\pi} \int_S \frac{1}{R} \cdot \frac{\partial U}{\partial \nu} dS, \quad (98)$$

где интеграл может быть истолкован как соответствующий полю простых зарядов, распределенных на поверхности  $S$  с плотностью, равной  $(\eta/4\pi)(\partial U/\partial \nu)$ .

Задачи о поле ВП рассмотрены как квазистатические. Тем не менее необходимо отметить роль времени. Измеряемый потенциал ВП, как видно из формулы (91), определяется дипольным моментом ВП, существующим, очевидно, в тот же момент времени. Разности потенциалов  $\Delta U_{\text{ВП}}$  и  $\Delta U$ , входящие в формулу (74) для вычислений кажущейся поляризуемости, измеряют в различные моменты времени

$$\eta_k = \frac{\Delta U_{\text{ВП}}(t)}{\Delta U_0 + \Delta U_{\text{ВП}}(0)}, \quad (99)$$

где  $\Delta U_{\text{ВП}}(0)$  — полное значение ВП, измеренное в конце зарядки;  $\Delta U_{\text{ВП}}(t)$  — лишь часть его, определяемая временем отсчета  $t$  после выключения тока.

Для линейного процесса ВП коэффициент  $\alpha_t = \Delta U_{\text{ВП}}(t)/\Delta U_{\text{ВП}}(0)$  не зависит от тока, но зависит от используемого временного или частотного режима измерений. Строго говоря, коэффициент  $\alpha_t$  остается неизвестным. Для практических целей необходимо лишь непременно указывать условия измерений  $\Delta U_{\text{ВП}}$  и  $\Delta U$ . Взаимосвязь между режимами измерений рассмотрена ранее.

Из положения о линейности процессов ВП вытекает справедливость принципа суперпозиции потенциалов полей ВП, соответствующих отдельно взятым источникам поляризующего тока. Тот же принцип, конечно, действует и в отношении потенциалов первичного поля. Если одному из токовых электродов  $A$  отвечает разность потенциалов

$$\Delta U_A = I \rho_{KA}/K_A, \quad (100)$$

где  $K_A$  — коэффициент установки, а второму токовому электроду  $B$  — разность потенциалов

$$\Delta U_B = I \rho_{KB}/K_B, \quad (101)$$

то суммарная разность потенциалов при одновременном действии обоих электродов, через которые течет одинаковый ток,

$$\Delta U_{AB} = \Delta U_A + \Delta U_B = I \left( \frac{\rho_{KA}}{K_A} + \frac{\rho_{KB}}{K_B} \right) = I \frac{\rho_{KAB}}{K_{AB}}, \quad (102)$$

причем

$$1/K_{AB} = 1/K_A + 1/K_B. \quad (103)$$

Отсюда следует, что независимо от структуры среды кажущееся удельное сопротивление, соответствующее влиянию обоих токовых электродов, из которых один положительный, а другой отрицательный, равно

$$\rho_{KAB} = (\rho_{KA} + \varphi \rho_{KB})/(1 + \varphi), \quad (104)$$

$$\text{где } \varphi = \frac{K_A}{K_B} = \frac{BM - BN}{AN - AM} \cdot \frac{AN \cdot AM}{BM \cdot BN}.$$

Аналогично из принципа суперпозиции следует, что если разность потенциалов поля ВП для одного электрода  $\Delta U_{\text{ВП}A} = \eta_{KA} \Delta U_A$ , для второго  $\Delta U_{\text{ВП}B} = \eta_{KB} \Delta U_B$ , то суммарная разность потенциалов ВП

$$\Delta U_{\text{ВП}AB} = \eta_{KA} \Delta U_A + \eta_{KB} \Delta U_B. \quad (105)$$

Кажущаяся поляризуемость, соответствующая влиянию обоих электродов токовой линии,

$$\eta_{KAB} = \frac{\Delta U_{\text{ВП}AB}}{\Delta U_{AB}} = \frac{\eta_{KA} \rho_{KA} + \varphi \eta_{KB} \rho_{KB}}{\rho_{KA} + \varphi \rho_{KB}}. \quad (106)$$

Поле ВП в однородной изотропной среде

В теории электроразведки [36, 82] показано, что в однородной бесконечной изотропной среде потенциал первичного поля, созданного точечным источником поля,

$$U_0 = (I/4\pi\sigma)(1/L), \quad (107)$$

где  $L$  — расстояние от источника тока до точки наблюдения.

Для получения потенциала поляризующего поля, согласно формуле (88), достаточно заменить  $\sigma$  на  $\sigma(1 - \eta)$ , где  $\eta$  — поляризуемость среды,

$$U = \{I/[4\pi\sigma(1 - \eta)]\} L^{-1}. \quad (108)$$

Потенциал поля ВП находим как разность формул (108) и (107)

$$U_{\text{ВП}} = \frac{I}{4\pi\sigma} \cdot \frac{\eta}{1 - \eta} \cdot \frac{1}{L}. \quad (109)$$

Нетрудно вычислить и напряженность полей

$$E = -\partial U / \partial L = \{I / [4\pi\sigma(1 - \eta)]\} \cdot (1/L^2); \quad (110)$$

$$E_{ВП} = -\frac{\partial U_{ВП}}{\partial L} = \frac{I}{4\pi\sigma} \cdot \frac{\eta}{1 - \eta} \cdot \frac{1}{L^2}. \quad (111)$$

Отношение потенциалов и напряженностей полей — величина постоянная:

$$\eta_k = \frac{U_{ВП}}{U} = \frac{E_{ВП}}{E} = \eta. \quad (112)$$

В условиях полупространства потенциал первичного поля удваивается

$$U_0 = \frac{I}{2\pi\sigma} \cdot \frac{1}{L}. \quad (113)$$

Вместе с ним удваиваются потенциалы поляризующего поля и поля ВП, а также напряженности всех полей. Но их отношение остается неизменным.

На практике измеряют разности потенциалов полей при разном взаимном положении токовых и измерительных электродов. Но в любом случае, как видно из формулы (106), если для отдельных электродов  $\eta_{КА} = \eta_{КВ} = \eta$ , то и общая кажущаяся поляризуемость  $\eta_{КАВ} = \eta$  независимо от коэффициента установки и значений  $\rho_k$ .

Кажущаяся поляризуемость остается равной истинной поляризуемости однородной среды при произвольном числе источников тока, поэтому и рельеф местности, влияние неровностей которого на первичное поле учитывается введением определенных фиктивных источников тока, не меняет формулы (112).

Ю. П. Булашевич [34] вычислил э. д. с. ВП, возникающую под действием тока на поверхности электропроводящей сферы, помещенной в однородное внешнее электрическое поле  $E_0$ .

В принятых обозначениях, поясненных на рис. 39,

$$\mathcal{E}_{ВП} = -\lambda E_v = -\kappa J_v = -\frac{3\lambda E_0 \cos \theta}{1 + 2p + 2\lambda/a}, \quad (114)$$

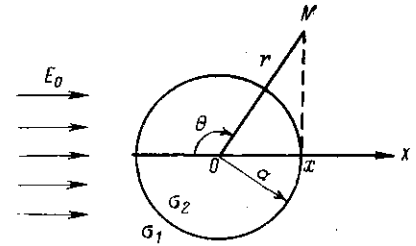
где  $\lambda$  и  $\kappa$  — коэффициенты поверхностной ВП, связь между которыми дана в формуле (11);  $a$  — радиус сферы;  $p = \sigma_1/\sigma_2$  — отношение электропроводностей вмещающей среды и сферы;  $\theta$  — полярный угол точек на поверхности сферы.

Если размер сферы велик, так что  $a \gg \lambda$ , то

$$\mathcal{E}_{ВП} = -3\lambda E_0 \cos \theta / (1 + 2p). \quad (115)$$

Тогда э. д. с. ВП достигает предельного значения, не зависящего от радиуса сферы. Множитель  $3/(1 + 2p)$  показывает отношение тока, протекающего через сечение сферы, к току в отсутствие аномалии электропроводности (при  $p = 1$ ). Такую же

Рис. 39. К выводу формулы для поля ВП электропроводящей сферы, помещенной в однородное поляризующее поле.



э. д. с. ВП можно измерить на контакте сферы, если поместить источник тока внутри нее и сохранить плотность тока на ее поверхности.

Для небольшой сферы, когда в рассматриваемый момент времени  $a \ll \lambda/(p + 1/2)$ ,

$$\mathcal{E}_{ВП} = -\frac{3}{2} a E_0 \cos \theta. \quad (116)$$

В этом случае э. д. с. не зависит от  $\lambda$  и определяется падением напряжения приложенного поля  $E_0$  на участке, длина которого в 1,5 раза больше радиуса сферы.

Внешнее поле ВП однородно поляризованной сферы эквивалентно полю диполя, момент которого

$$m_{ВП} = -\frac{3\lambda a^2 E_0}{(1 + 2p)(1 + 2p + 2\lambda/a)}. \quad (117)$$

Если в каждой единице объема среды содержится  $n$  включений, то с учетом формулы (77) момент ВП единицы объема

$$P_{ВП} = n m_{ВП} = -n \frac{3\lambda a^2 (E - E_{ВП}^*)}{(1 + 2\bar{p})(1 + 2\bar{p} + 2\lambda/\alpha)}, \quad (118)$$

где  $E$  — полное поляризующее поле;  $E_{ВП}^*$  — поле ВП среды, заполненной включениями;  $\bar{p} = (\bar{\sigma}/\sigma_1) p$ ;  $\bar{\sigma}$  — средняя электропроводность этой среды.

Согласно В. Р. Бурсиану [36],

$$\frac{\bar{\sigma}}{\sigma_1} = 1 + \frac{3\xi(1 - p)}{1 + 2p - \xi(1 - p)}, \quad (119)$$

где  $\xi$  — объемная концентрация включений.

Сравнив формулы (118) и (78) и выполнив простые преобразования с учетом, что  $\xi = \frac{3}{4} \lambda a^3 n$ , получим

$$\eta_{\pm}^* = E_{ВП}^*/E = \beta_{\pm} \xi / (1 + \beta_{\pm} \xi), \quad (120)$$

где  $\beta$  — коэффициент, пропорциональный моменту ВП единицы объема каждого включения; индексы  $n$  и  $s$  указывают на возможные различия значений коэффициента соответственно измерениям  $E$  во время пропускания тока и  $E_{ВП}^*$  — во время спада ВП после выключения тока.

При  $\xi = 1\%$   $\beta = \eta^*$ , если поляризуемость выражена в процентах,

$$\beta = \frac{9\lambda/a}{(2p+1)(2p+1+2\lambda/a)}. \quad (121)$$

Объемная концентрация сферических включений одинакового размера при самой плотной упаковке их не превышает 0,74. Приведенный расчет предполагает разобщенность включений. Поэтому значение  $\xi = 0,3$  можно принять как границу практической применимости формулы (120).

Обычно электропроводящие минералы имеют электропроводность на несколько порядков выше, чем вмещающие породы, и можно считать  $p \ll 1$ , тогда

$$\beta = 9/(2 + a/\lambda). \quad (122)$$

Если электропроводность включений не столь велика, поляризуемость становится меньше, например, при  $\sigma_2 = \sigma_1$

$$\beta = 3/(2 + a/\lambda), \quad (123)$$

т. е. в 3 раза меньше, чем при  $\sigma_2 \gg \sigma_1$ .

К существенному уменьшению  $\beta$ , как показал Б. И. Геннадик [59], приводит наличие вокруг каждого включения оболочки из хорошо проводящего вещества (например, минерализованной влаги вокруг окисляющегося сульфидного зерна) или прохода проводящего вещества (например, кварцевой или карбонатной оторочки). Формула (122) характеризует максимальное значение  $\beta$ , возможное при сферических включениях.

Обычно для рудных минералов  $\lambda > 5$  см,  $a < 1$ . Допуская, что  $a/\lambda \ll 2$ , в соответствии с формулой (122), имеем  $\beta = 9/2$  и при небольшой концентрации включений  $\eta^* = 9\xi/2$ . Таким образом, вкрапленность рудных минералов, занимающая только 1% объема вмещающей породы, может повысить поляризуемость этой породы на 4,5%. Вследствие этого можно ожидать весьма высокой чувствительности метода ВП к вкрапленности электронных проводников.

Выше предполагалось, что среда, вмещающая включения, не поляризуется. Если учесть поляризуемость вмещающей ионопроводящей среды  $\eta_1$ , то общая поляризуемость среды с электропроводящими включениями

$$\eta_2 = \eta_1(1 - \xi) + \eta^*. \quad (124)$$

Последняя формула, очевидно, применима к любому моменту времени, но  $\eta_1$  и  $\eta^*$  могут меняться по-разному, и тогда соотношение членов суммы (124) зависит от времени отсчета ВП. Поляризация ионопроводящих пород протекает быстрее, чем электронных проводников, поэтому роль вкрапленности в общей поляризуемости породы относительно возрастает с увеличением времени.

#### Временные характеристики поляризуемости

В формулах, описывающих э. д. с. ВП на поверхности сферического включения, от времени зависит только коэффициент  $\lambda$ .

Для сферы достаточно большого радиуса, как видно из формулы (115), временная зависимость э. д. с. и коэффициента  $\lambda$  одна и та же. Такой же она будет при измерении э. д. с. ВП с установкой, показанной на рис. 6, а.

Примем за переходную характеристику  $F(T)$  коэффициента поверхностной поляризации  $\lambda$  отношение экспериментальных значений э. д. с. ВП или  $\lambda_T$  в тот или иной момент времени  $T$  к их асимптотическим значениям после продолжительной зарядки

$$F(T) = \lambda_T/\lambda_\infty. \quad (125)$$

При этом, конечно,  $F(T) = 0$  при  $T = 0$  и  $F(T) \rightarrow 1$  при  $T \rightarrow \infty$ . Временной параметр  $T_0$  для коэффициента  $\lambda_T$  определим как время максимума  $dF(T)/d \ln T$ .

Переходную характеристику э. д. с. ВП для сферы произвольного радиуса получим из формулы (114):

$$F_a(T) = \frac{\mathcal{E}_{\text{ВП}}(\lambda_T)}{\mathcal{E}_{\text{ВП}}(\lambda_\infty)} = \frac{C+1}{C+F(T)} F(T), \quad (126)$$

где  $F(T)$  соответствует формуле (125);  $C$  — вводимый нами поляризационный коэффициент формы, для сферы равный

$$C = \frac{a}{\lambda_\infty} (p + 1/2). \quad (127)$$

Электрическое поле, создаваемое поляризованным телом, имеет ту же временную зависимость, что э. д. с. ВП. Соответственно временной параметр  $T_{\text{max}}$  поля ВП при любом радиусе сферы может быть найден из уравнения

$$d^2 F_a(T)/d(\ln T)^2 = 0. \quad (128)$$

Для решения уравнения надо знать  $F(T)$  и  $C$ .

В случае экспоненциальной переходной характеристики, описанной формулой (43), уравнение (128) приобретает вид

$$(C+1)(1 - T_{\text{max}}/T_0) - (1 + T_{\text{max}}/T_0)e^{-T_{\text{max}}/T_0} = 0. \quad (129)$$

Оно является трансцендентным и решено численно методом последовательных приближений с помощью ЭВМ М-222 по программе, составленной А. Н. Шувал-Сергеевым. С достаточной для практических целей точностью ответ можно выразить формулой

$$T_{\text{max}} = CT_0/(C+1). \quad (130)$$

Для маленьких сфер ( $C \ll 1$ ) временной параметр  $T_{\text{max}}$  пропорционален радиусу сферы. Для больших сфер ( $C \gg 1$ ) значение  $T_{\text{max}}$  асимптотически приближается к  $T_0$  и не зависит от радиуса.

В случае переходной характеристики, заданной в виде функции интеграла вероятности (57), строгое решение уравнения (128)

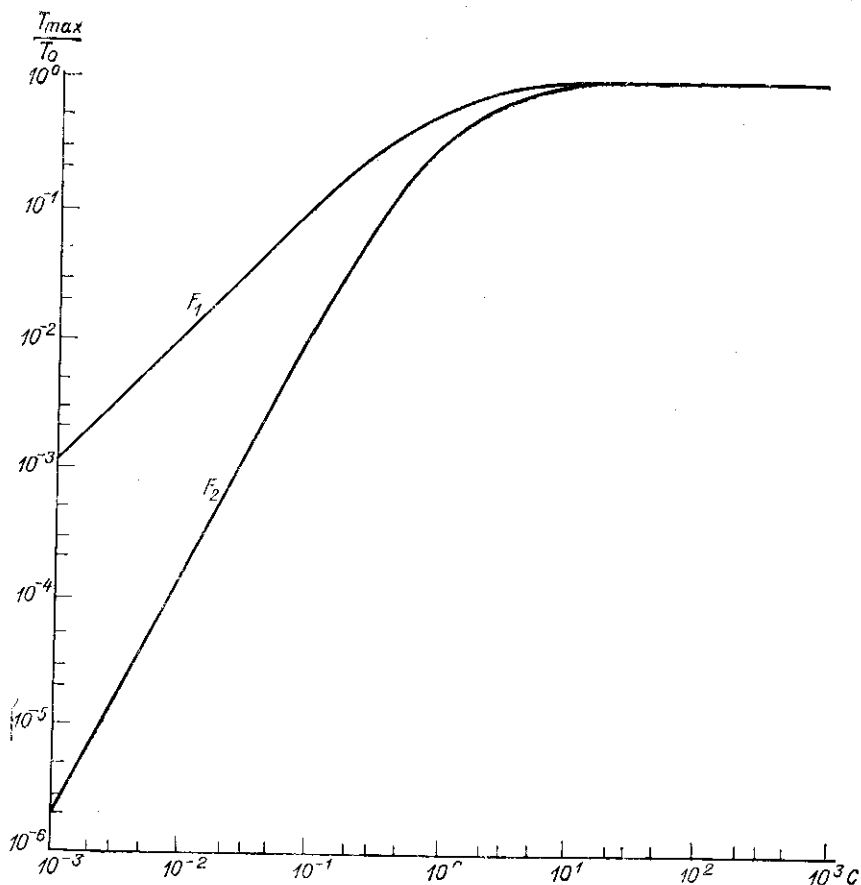
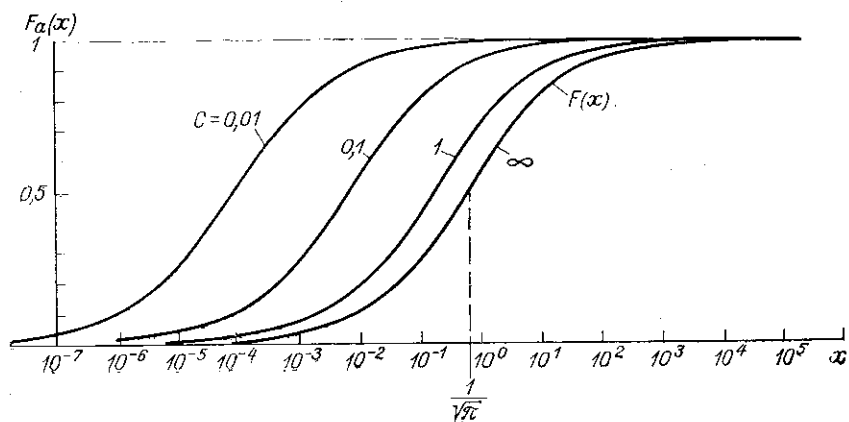


Рис. 40. Переходные характеристики ВП для сфер различного размера.

Рис. 41. Зависимость постоянной времени поляризации сфероидального включения от поляризационного коэффициента формы  $C$  для двух выражений электрохимических процессов  $F_1 = 1 - e^{-x}$  и  $F_2 = 1 - e^x \operatorname{erfc}(\sqrt{x})$ .

становится громоздким. Приближенное решение найдено с помощью формулы (126). Графики функции  $F_a$  при различных значениях  $C$  приведены в логарифмическом масштабе безразмерного аргумента  $x = T/(T_0 \sqrt{\pi})$  на рис. 40. Из них следует, что точка перегиба функции  $F_a(x)$  остается примерно на уровне  $F_a(x) = 0,5$  даже при малых значениях  $C$ . Соответственно и искомый аргумент  $x_{\max}$  максимума  $dF_a(x)/d \ln(x)$  входит в уравнение

$$F_a(x_{\max}) = (C + 1)F(x_{\max})/[C + F(x_{\max})] = 1/2, \quad (131)$$

из которого следует, что

$$F(x_{\max}) = C/(2C + 1). \quad (132)$$

Для каждого заданного значения  $C$  по формуле (132) нетрудно вычислить  $F(x_{\max})$ , затем по графику  $F(x)$  найти  $x_{\max} = T_{\max}/(T_0 \sqrt{\pi})$ . Полученная зависимость  $T_{\max}/T_0$  от  $C$  показана на рис. 41. При относительно маленьком радиусе сфер, когда  $C \ll 1$ ,  $x_{\max} = \pi C^2/4$  и

$$T_{\max} = x_{\max} T_0 \sqrt{\pi} = \frac{\pi \sqrt{\pi}}{4} \cdot \frac{a^2}{\lambda_{\infty}^2} \left( \rho + \frac{1}{2} \right)^2 T_0. \quad (133)$$

Временной параметр  $T_{\max}$  оказывается пропорциональным квадрату радиуса сферы, пока  $C \ll 0,1$ . Этот вывод согласуется с ответом, полученным В. В. Кормильцевым и Р. В. Улитиним [158] при решении задачи о концентрационной поляризации сферического включения. При  $C > 10$  параметр  $T_{\max}$  достигает предельного значения  $T_0$ , соответствующего измерениям э. д. с. ВП с трехэлектродной установкой.

Для экспериментальной проверки теоретических представлений К. Г. Шубникова измерила э. д. с. ВП на сферической модели, изготовленной из технического графита. Использована аппаратура из разработанной Л. М. Иоффе станции СВП-74, описанной ниже.

В приведенном на рис. 42 примере результатов опытов радиус модели  $a = 1,55$  см, ее удельное сопротивление  $\rho_2 < 0,1$  Ом·м. Вмещающей средой служил влагонасыщенный кварцевый песок ( $\rho_1 = 26$  Ом·м). При измерениях с трехэлектродной установкой, схема которой дана на рис. 6, а, сила тока составляла 1,4 мА; плотность тока на поверхности сферы  $J = 0,46$  А/м²; напряженность поля во вмещающей среде на границе с моделью  $E_v = J \rho_1 = 12$  В/м; асимптотическое значение э. д. с. ВП  $\mathcal{E}_{\text{ВП}} = 0,54$  В. Соответственно стационарный коэффициент поверхностной поляризации  $\lambda_{\infty} = 0,54 : 12 = 0,045$  м = 4,5 см.

На графике 1 показана временная зависимость  $\mathcal{E}_{\text{ВП}}$ , на графике 2 — производная э. д. с. ВП по десятичному логарифму времени \*. Аргумент максимума производной  $T_0 = 50$  с.

\* Основание логарифма влияет только на вертикальный масштаб графика производной. Чтобы амплитуда графика не была чрезмерно малой, на практике удобнее пользоваться десятичными логарифмами вместо натуральных, принятых для теоретических расчетов.

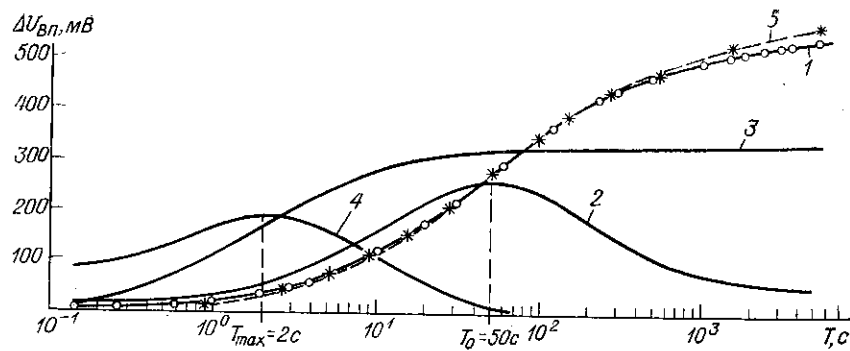


Рис. 42. Экспериментальные временные характеристики ВП.

Трехэлектродная установка: 1 — напряжение ВП; 2 — производная напряжения по десятичному логарифму времени; четырехэлектродная установка: 3 — напряжение, 4 — производная напряжения; 5 — теоретические значения напряжения, соответствующие функции интеграла вероятности.

На графике 3 показана временная зависимость напряжения ВП, измеренного над той же моделью с помощью четырехэлектродной установки, условия возбуждения ВП в которой соответствуют рис. 39. Модель находилась посередине бака, токовые электроды — у его стенок. При силе тока 0,02 А и сечении бака 0,1 м<sup>2</sup> напряженность поляризующего поля в районе модели составляла 0,26 В/м. Разнос измерительных электродов равнялся диаметру модели. Асимптотическое значение напряжения поля ВП составляло 33 мВ (вертикальный масштаб графика 3 в 10 раз крупнее, чем графика 1).

На графике 4 показана производная напряжения ВП по логарифму времени, аргумент максимума  $T_{\max} = 2$  с.

На графике 5 показаны теоретические значения функции  $F(T)$ , вычисленные по формуле (57) при  $T_0 = 50$  с. Вертикальный масштаб подобран так, чтобы амплитуда теоретического графика была такой же, как экспериментального. Графики 1 и 5 имеют практически одну и ту же форму, что подтверждает пригодность обсуждаемой функции для описания временных свойств поздней стадии вызванной поляризации.

В условиях опыта  $C = 1,55/(2 \cdot 4,5) = 0,17$ ;  $x_{\max} = 2/(50 \sqrt{\pi}) = 0,022$ . Эти значения согласуются с координатами соответствующей точки на графике функции  $C(x_{\max})$ , приведенном на рис. 41.

\* \* \*

Поле ВП, создаваемое одинаковыми сферическими включениями, имеет ту же переходную характеристику, что э. д. с. ВП отдельного включения. Соответственно коэффициент  $\beta$ , определяющий связь поляризуемости с концентрацией включений, имеет переходную характеристику, выражаемую формулой (126):

$$F(\beta) = \beta(T)/\beta(\infty) = F_a(T) = (C + 1)F(T)/[C + F(T)]. \quad (134)$$

Значение  $\beta(\infty)$  дает формула (121) при  $\lambda = \lambda_{\infty}$ . С учетом этого из формулы (121) и (134) получаем временную зависимость

$$\beta(T) = \beta(\infty)F_a(T) = 9F(T)/[2(2\bar{p} + 1)[C + F(T)]]. \quad (135)$$

Поверхностную поляризацию  $\lambda$  в зависимости от исследуемой стадии ВП можно отображать экспоненциальной функцией (43), функцией интеграла вероятности (57), логарифмической функцией (63) или их комбинацией. Значения функций даны в табл. 18, 19.

Для обычных условий, когда  $\bar{p} \ll 1/2$ ,  $C = a/(2\lambda_{\infty})$  и

$$\beta(T) = 9F(T)/\{2[C + F(T)]\}. \quad (136)$$

Если поле ВП измеряют после выключения тока, то  $\beta_c$ , входящее в формулу (120), надо найти, применив к формуле (135) преобразование (29). Аналогично можно найти значения  $\beta$  для измерений на переменном токе, используя установленное соотношение времени и частоты:  $\omega T = 1$  или  $\omega T = (\sqrt{\pi})^{-1}$ .

Поле ВП сфероида впервые с некоторыми упрощениями вычислил А. А. Гельбух [58], чуть позднее и точнее — Р. Розлер [396]. Задачу о сплюснутым сфероиде обстоятельно исследовала Л. С. Хлопонина [280, 294]. Поляризуемость сред со сфероидальными включениями в наиболее полном виде теоретически изучил Б. И. Геннадик [59, 60], но полученные им формулы сложны для практического использования.

В статье А. А. Гельбуха [58] даны формулы для моментов ВП сильно вытянутых и сильно сплюснутых электропроводящих сфероидов, выведенные способом, использованным Ю. П. Булашевичем [36] для решения задачи о сфере. Поделив значение момента ВП при  $\lambda_T$  на соответствующее  $\lambda_{\infty}$ , получим, как при выводе формулы (126), выражение переходной характеристики ВП  $F_a(T)$ . Далее из формулы (126) с учетом формулы (125) получим выражение поляризационного коэффициента формы:

$$C = [1 - F_a(T)]\lambda_T/[\lambda_{\infty}F_a(T) - \lambda_T]. \quad (137)$$

С помощью указанной операции из формул А. А. Гельбуха получены значения  $C$ , выражаемые общей формулой

$$C = l(p + G)/\lambda_{\infty}, \quad (138)$$

где  $l$  — длина той полуоси сфероида, вдоль которой направлено приложенное поле;  $p = \sigma_1/\sigma_2$ ;  $\sigma_1, \sigma_2$  — электропроводность вмещающей среды и сфероида;  $G$  — некоторая безразмерная величина, равная:

1)  $(a^2/c^2)[\ln(2c/a) - 1]$  — для сильно вытянутого сфероида в поле, параллельном оси вращения;  $l = c$ ;  
2) 1 — для того же вытянутого сфероида в перпендикулярном поле;  $l = a$ ;

3)  $2\pi \cdot a/c$  — для сильно сплюснутого сфероид в поле, параллельном оси вращения;  $l = c$ ;  
 4)  $\pi/4 \cdot c/a$  — для того же сплюснутого сфероид в перпендикулярном поле;  $l = a$ ;

( $c$  — полуось сфероид вдоль оси вращения;  $a$  — полуось поперек оси вращения).

Для сферы  $G = 1/2$ .

Дальнейшие исследования показали, что

$$G = N/(4\pi - N), \quad (139)$$

где  $N$  — параметр, численно равный коэффициенту размагничивания, который описывается следующими формулами [321]:

$$N_1 = 4\pi \frac{a^2}{c^2 - a^2} \left( \frac{c}{2\sqrt{c^2 - a^2}} \ln \frac{c + \sqrt{c^2 - a^2}}{c - \sqrt{c^2 - a^2}} - 1 \right); \quad (140)$$

$$N_2 = 2\pi \frac{a^2 c}{2(c^2 - a^2)\sqrt{c^2 - a^2}} \left( \frac{2c\sqrt{c^2 - a^2}}{a^2} - \ln \frac{c + \sqrt{c^2 - a^2}}{c - \sqrt{c^2 - a^2}} \right); \quad (141)$$

$$N_3 = 4\pi \frac{a^2 c}{(a^2 - c^2)\sqrt{a^2 - c^2}} + \frac{\sqrt{a^2 - c^2}}{c} - \arcsin \frac{\sqrt{a^2 - c^2}}{a}; \quad (142)$$

$$N_4 = 2\pi \frac{a^2 c}{(a^2 - c^2)\sqrt{a^2 - c^2}} \left( \arcsin \frac{\sqrt{a^2 - c^2}}{a} - \frac{c\sqrt{a^2 - c^2}}{a} \right), \quad (143)$$

в которых индексы  $N$  соответствуют вышеприведенному перечню.

По формулам (139)–(143) вычислены значения  $G$ , приведенные в табл. 20.

На поляризационный коэффициент формы  $S$  существенно влияют размер сфероид, его форма, ориентировка относительно приложенного поля, электропроводность (через  $\rho$ ) и состав (через  $\lambda_\infty$ ). По формуле (138), задав свойства сфероид, можно вычислить  $S$ , а с помощью графика  $S(x_{\max})$  на рис. 41 вычислить  $x_{\max}$  и затем временной параметр  $T_{\max} = x_{\max} T_0 \sqrt{\pi}$ .

С учетом формулы (138) формула (135) преобразуется в более общее выражение временной зависимости поляризуемости среды, содержащей сфероидальные включения:

$$\beta(T) = (G + 1)^2 F(T) / \{(\bar{\rho} + G)[C + F(T)]\}, \quad (144)$$

где использованы обозначения, расшифрованные в пояснениях к формулам (135), (138) и (139).

Из четырех сфероидов лишь стержневидный, ориентированный поперек приложенного поля, имеет временной параметр ВП, уступающий по значению параметру для сферы того же объема. В остальных случаях: для диска, ориентированного любым образом, и для стержня, параллельного приложенному полю, — временной параметр больше, чем для сферы. Это означает, что при одинаковой объемной концентрации включений пленочная и нитевидная рудная минерализация отличается большим значением

ТАБЛИЦА 20

Электрический коэффициент формы  $G$  для сфероидов, помещенных в однородное поле

| Отношение полуосей сфероид * | Поле направлено вдоль оси вращения и полуоси $c$ ( $l = c$ ) |                | Поле направлено поперек оси вращения и полуоси $a$ ( $l = a = b$ ) |                |
|------------------------------|--------------------------------------------------------------|----------------|--------------------------------------------------------------------|----------------|
|                              | Удлиненный сфероид                                           | Сжатый сфероид | Удлиненный сфероид                                                 | Сжатый сфероид |
| 1                            | 0,500                                                        | 0,500          | 0,500                                                              | 0,500          |
| 1,25                         | 0,380                                                        | 0,645          | 0,568                                                              | 0,432          |
| 1,50                         | 0,303                                                        | 0,800          | 0,622                                                              | 0,380          |
| 2                            | 0,210                                                        | 1,116          | 0,704                                                              | 0,309          |
| 3                            | 0,122                                                        | 1,746          | 0,804                                                              | 0,220          |
| 5                            | 0,057                                                        | 3,00           | 0,892                                                              | 0,143          |
| 10                           | 0,0207                                                       | 6,20           | 0,953                                                              | 0,0748         |
| 20                           | 0,00732                                                      | 12,50          | 0,978                                                              | 0,0382         |
| 50                           | 0,00145                                                      | 31,8           | 0,995                                                              | 0,0155         |
| 100                          | 0,00045                                                      | 63,8           | 0,998                                                              | 0,0078         |
| $\infty$                     | 0                                                            | $\infty$       | 1,0                                                                | 0              |

\* Для удлиненного сфероид берется отношение  $c/a$ , для сжатого  $a/c$ .

временного параметра ВП по сравнению с рассеянной «точечной» минерализацией.

Если приложенное поле направлено под косым углом к оси вращения сфероид, то поле  $E_0$  надо разложить на составляющие вдоль и поперек оси вращения и для каждой из них порознь вычислить составляющие поля ВП, сумма которых дает результирующее поле ВП, при этом, конечно, временная зависимость ВП усложнится. К такому же результату приводит наличие в среде включений различных размеров, формы и ориентировки.

Если первичное поле характеризуется функцией электропроводности среды  $F(\sigma_i)$ , то поляризующему полю в объемно поляризуемой среде соответствует та же функция  $F(\sigma_i^*)$ , но при ином аргументе, определенном формулой (88). Поле ВП выражается как приращение функции  $F(\sigma_i)$  при изменении аргумента:

$$\Delta\sigma_i = \sigma_i^* - \sigma_i = -\sigma_i \eta_i. \quad (145)$$

Кажущаяся поляризуемость определяется как отношение приращения функции  $F(\sigma_i)$  к ее конечному значению:

$$\eta_k = \frac{F(\sigma_i^*) - F(\sigma_i)}{F(\sigma_i^*)} = \frac{\rho_k^* - \rho_k}{\rho_k^*} = \frac{\Delta\rho_k}{\rho_k + \Delta\rho_k}, \quad (146)$$

где  $\rho_k^*$  — кажущееся удельное сопротивление, соответствующее сопротивлению поляризующего поля, измеренного в конце зарядки;  $\rho_k$  — то же первичного поля, причем расположение токовых

и измерительных электродов может быть любым; функция  $F(\sigma_i)$  — потенциал, разность потенциалов или напряженность поля.

В теории электроразведки кажущееся удельное сопротивление нередко представляется в виде

$$\rho_k = \rho_1 [1 + f(p_i)], \quad (147)$$

где  $p_i = \sigma_1/\sigma_i = \rho_i/\rho_1$ ;  $f$  — функция не только соотношений удельных сопротивлений тел и вмещающей их среды  $\rho_i$ , но и расположения электродов относительно тел.

Из формул (146) и (147) имеем

$$\eta_k = \eta_1 + (1 - \eta_1)[f(p_i^*) - f(p_i)]/[1 + f(p_i^*)], \quad (148)$$

где

$$p_i^* = \frac{\sigma_1^*}{\sigma_i^*} = p_i \frac{1 - \eta_1}{1 - \eta_i} = p_i + p_i \frac{\eta_i - \eta_1}{1 - \eta_i}. \quad (148^*)$$

Разность кажущейся  $\eta_k$  и истинной поляризуемости вмещающей среды  $\eta_1$  определяет аномалию кажущейся поляризуемости

$$\eta_{ан} = \eta_k - \eta_1 = (1 - \eta_1)[f(p_i^*) - f(p_i)]/[1 + f(p_i^*)]. \quad (149)$$

С помощью формул (146), (148) и (149) можно вычислить точные значения  $\eta_k$  и  $\eta_{ан}$ . Достаточную для практики точность нередко обеспечивает способ приближенных вычислений, сводящийся к замене конечной разности функции многих переменных суммой частных производных:

$$\begin{aligned} \Delta \rho_k &= d\rho_k + \frac{1}{2} d^2 \rho_k + \frac{1}{3} d^3 \rho_k \approx d\rho_k = \\ &= \sum_{i=1}^m \Delta \rho_i \frac{\partial \rho_k}{\partial \rho_i} \approx \sum_{i=1}^m \rho_i \eta_i \frac{\partial \rho_k}{\partial \rho_i}, \end{aligned} \quad (150)$$

где  $m$  — число компонентов среды, различающихся по поляризуемости и удельному сопротивлению.

С учетом суммы (150) из формул (146) и (149) получаем

$$\eta_k \approx \frac{1}{\rho_k} \sum_{i=1}^m \eta_i \rho_i \frac{\partial \rho_k}{\partial \rho_i} = \sum_{i=1}^m \eta_i \frac{\partial \ln \rho_k}{\partial \ln \rho_i}; \quad (151)$$

$$\eta_{ан} = \frac{\rho_1}{\rho_k} \sum_{i=2}^m (\eta_i - \eta_1) \frac{\partial f(p_i)}{\partial \rho_i} \rho_i. \quad (152)$$

Для двухкомпонентной среды ( $m = 2$ )  $p_2 = \rho_2/\rho_1$ ;  $\partial f(p_i)/\partial \rho_i = \partial \rho_k/\partial \rho_2$  и из формулы (152) имеем

$$\eta_{ан} = (\eta_2 - \eta_1) \frac{\rho_2}{\rho_k} \cdot \frac{\partial \rho_k}{\partial \rho_2}, \quad (153)$$

или, как предложил Г. Сигел [404],

$$\vartheta = \frac{\eta_{ан}}{\eta_2 - \eta_1} = \frac{\rho_2}{\rho_k} \cdot \frac{\partial \rho_k}{\partial \rho_2} = \frac{\partial \ln \rho_k}{\partial \ln \rho_2}, \quad (154)$$

где  $\vartheta$  — аномальная кажущаяся поляризуемость, нормированная по избыточной поляризуемости тела;  $\eta_1, \eta_2$  — поляризуемость вмещающей среды и тела.

Из формулы (152) следует, что если  $\eta_i = \eta_1$ , то  $\eta_{ан} = 0$  независимо от распределения удельного сопротивления, расположения электродов, рельефа местности и других факторов, влияющих на  $\rho_k$ .

Если компоненты среды различаются по поляризуемости, но не различаются по удельному сопротивлению, так что  $p_i = 1$  и  $\rho_k = \rho_1$ , то  $f(p_i) = 0$  и

$$\frac{\eta_k - \eta_1}{1 - \eta_1} = \frac{f(p_i^*)}{1 + f(p_i^*)} = \frac{(\rho_k/\rho_1)_{ВП} - 1}{(\rho_k/\rho_1)_{ВП}}, \quad (155)$$

где  $p_i^* = (1 - \eta_1)/(1 - \eta_i)$ ;  $(\rho_k/\rho_1)_{ВП}$  соответствует тому кажущемуся удельному сопротивлению, которое было бы при заданном расположении электродов в среде, если бы ее компоненты различались по удельному сопротивлению так, что  $\rho_i/\rho_1 = (1 - \eta_1)/(1 - \eta_i)$ .

В этих условиях аномалию кажущейся поляризуемости можно вычислить путем несложного пересчета теоретических данных о аномалиях  $\rho_k$ . Надо только подчеркнуть, что соотношение (155) формальное, не отражающее различной природы аномалий  $\eta_k$  и  $\rho_k$ . При работах методом ВП обязательно вычисляются  $\eta_k$  и  $\rho_k$ . Связь между ними ни в коей мере не подчиняется формуле (155). Последняя лишь дает возможность формально сопоставить среды, различающиеся по поляризуемости, но одинаковые по электропроводности, со средами, различающимися по электропроводности, но одинаковыми по поляризуемости. Аномалия  $\eta_k$ , созданная объектом, имеющим высокую поляризуемость, по форме аналогична аномалии  $\rho_k$  над тем же объектом, наделенным определенным повышенным сопротивлением.

Числитель дроби в формуле (146) соответствует полю ВП, измеряемому обычно после выключения тока. Поляризуемость, содержащаяся в знаменателе дроби, всегда соответствует измерениям суммарного поля во время пропускания тока. Если бы временные характеристики всех компонентов были одинаковыми, то соотношение кажущейся и истинных поляризуемостей не зависело бы от времени. В действительности же рост со временем поляризуемости пород, обусловленной включениями электропроводящих минералов, создает тенденцию роста относительной аномалии кажущейся поляризуемости.

В теории электроразведки [36, 160] в качестве физической модели метаморфических сланцев и других слоистых пород рассматривают среды, состоящие из чередующихся параллельных слоев, имеющих удельное сопротивление  $\rho_1$  и  $\rho_2$ , толщину  $d_1$  и  $d_2$ . Уста-

повлено, что среднее удельное сопротивление поперек слоев  $\rho_v = (\rho_1 d_1 + \rho_2 d_2)/(d_1 + d_2)$  и вдоль них  $\rho_\tau = [\rho_1 \rho_2 (d_1 + d_2)]/(\rho_2 d_2 + \rho_1 d_1)$ .

Примем, что слои 1-го вида имеют поляризуемость  $\eta_1$ , 2-го —  $\eta_2$ . Затем, воспользовавшись формулой (146), получим среднюю поляризуемость поперек слоев

$$\eta_v = \frac{\rho_v^* - \rho_v}{\rho_v^*} = \frac{\eta_1 + \eta_2 \frac{1 - \eta_1}{1 - \eta_2} \cdot \frac{d_2}{d_1} \cdot \frac{\rho_2}{\rho_1}}{1 + \frac{1 - \eta_1}{1 + \eta_2} \cdot \frac{d_2}{d_1} \cdot \frac{\rho_2}{\rho_1}}, \quad (156)$$

вдоль слоев

$$\eta_\tau = \frac{\rho_\tau^* - \rho_\tau}{\rho_\tau^*} = \frac{\eta_1 + \eta_2 \frac{d_2}{d_1} \cdot \frac{\rho_1}{\rho_2}}{1 + \frac{d_2}{d_1} \cdot \frac{\rho_1}{\rho_2}}. \quad (157)$$

Из выражений (156), (157) вытекает, что слоистые среды обладают анизотропией поляризуемости, если только их компоненты различаются по поляризуемости. Средняя поляризуемость может меняться в пределах от  $\eta_1$  до  $\eta_2$ . Поляризуемость поперек слоев приближается к поляризуемости плохо проводящих слоев, так как  $\eta_v \rightarrow \eta_2$  при  $d_2/d_1$  не очень малом и  $\rho_2 \gg \rho_1$ . Поляризуемость вдоль слоев приближается к поляризуемости хорошо проводящих слоев, так как  $\eta_\tau \rightarrow \eta_1$  при  $d_2/d_1$  не очень большом и  $\rho_2 \gg \rho_1$ . Увеличение толщины тех или иных слоев приводит к соответствующему возрастанию их роли, так что средняя поляризуемость приближается к поляризуемости слоев с большей толщиной. При одинаковой поляризуемости слоев независимо от их удельного сопротивления и толщины анизотропия поляризуемости отсутствует, т. е.  $\eta_v = \eta_\tau$ .

В некоторых случаях породы содержат сульфидные или иные электропроводящие прожилки. Образец такой породы, имеющий призматическую форму и содержащий прожилки, параллельный торцевым граням, можно рассматривать как элемент слоистой среды, поляризуемой током, идущим поперек рудных прожилков. Разность потенциалов ВП на торцах образца складывается из объемной э. д. с. ВП вмещающей породы и поверхностной э. д. с. ВП на контактах прожилка:

$$\Delta U_{\text{ВП}} = \eta_1 \Delta U_L + \lambda_t \Delta U_L/L, \quad (158)$$

где  $L$  — длина образца за вычетом толщины рудного прожилка;  $\Delta U_L$  — падение напряжения на этой длине во время зарядки;  $\lambda_t$ ,  $\eta_1$  — коэффициент поверхностной поляризации и поляризуемость вмещающей породы в момент  $t$  отсчета  $\Delta U_{\text{ВП}}$ .

Пренебрегая падением напряжения на омическом сопротивлении рудного прожилка, получаем разность потенциалов поляризующего поля

$$\Delta U_{\text{пр}} = \Delta U_L + \lambda_0 \Delta U_L/L, \quad (159)$$

где  $\lambda_0$  — коэффициент поверхностной поляризации во время зарядки.

Из формул (158) и (159) получаем искомую среднюю поляризуемость образца с прожилком:

$$\eta_{\text{ср}} = \frac{\Delta U_{\text{ВП}}}{\Delta U_{\text{пр}}} = \frac{\eta_1 + \lambda_t/L}{1 + \lambda_0/L}. \quad (160)$$

Значение  $\lambda$  — порядка единиц и иногда десятков сантиметров, оно соизмеримо с обычной длиной образца. Поэтому роль рудных прожилков при измерении поляризуемости образцов очень важна. Например, при  $\lambda_t/L = 1/2$ ;  $\lambda_t = 0,7\lambda_0$  и  $\eta_1 = 2\%$  средняя поляризуемость достигает 30%, а при  $\lambda_t/L = 2$  превышает 50%. Если в природных условиях концентрация рудных прожилков меньше, чем в исследуемом образце, то поляризуемость его значительно превышает поляризуемость большего объема той же породы.

Для более надежной характеристики породы следует измерять значения  $\Delta U_{\text{ВП}}$  и  $\Delta U_{\text{пр}}$  на многих образцах, а среднюю поляризуемость искать как отношение сумм, измеренных на всех образцах разностей потенциалов, отнесенных к единой силе тока:

$$\eta_{\text{ср}} = \frac{\sum \frac{\Delta U_{\text{ВП}}}{\Delta U_{\text{пр}}} R}{\sum R},$$

где  $R = \Delta U_{\text{пр}}/I$ .

В тех случаях, когда хорошо проводящий рудный прожилки идет вдоль образца и касается блоков электродов (схема установки показана на рис. 25, в), ток практически идет только по прожилку и объемная поляризация породы проявляется слабо по сравнению с собственной поляризацией прожилка. В итоге  $\Delta U_L$  оказывается много меньше, чем  $\Delta U_{\text{пр}}$ , а наблюдаемая поляризуемость — близкой 100% при разных значениях  $\lambda_t$ . Тогда можно вычислить

$$\lambda_t = MN \Delta U_{\text{ВП}}/\Delta U_0,$$

где  $\Delta U_0$  — омическое падение напряжения на образце в начале зарядки;  $MN$  — расстояние между измерительными электродами.

Анизотропия поляризуемости слоистой среды порождает анизотропию кажущейся поляризуемости, наблюдаемой в полевой обстановке. Если токовые и измерительные электроды расположены на одной прямой, то независимо от их разносов \* кажущееся удельное сопротивление

$$\rho_k = \frac{V \sqrt{\rho_v \rho_\tau}}{V \sqrt{1 + (\rho_v/\rho_\tau - 1) \sin^2 \varphi \sin^2 \alpha}}, \quad (161)$$

где  $\rho_v$  — удельное сопротивление среды в направлении, перпендикулярном к слоистости;  $\rho_\tau$  — то же, продольном слоистости;  $\alpha$  — угол

\* Расстояние между токовым и измерительным электродами, очевидно, должно быть значительно больше толщины слоев.

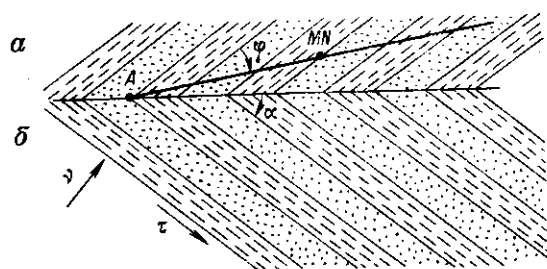


Рис. 43. К выводу формулы для кажущейся поляризуемости в однородной анизотропной среде.

$\alpha$  — план поверхности среды,  $\beta$  — ее разрез.

падения пород;  $\varphi$  — угол между простиранием пород и линией наблюдений (рис. 43). Применяв к формуле (161) преобразование (146), получим

$$\eta_k = 1 - \sqrt{\frac{(1 - \eta_v)(1 - \eta_\tau) \left\{ 1 + \left[ \frac{\rho_v(1 - \eta_\tau)}{\rho_\tau(1 - \eta_v)} - 1 \right] \sin^2 \varphi \sin^2 \alpha \right\}}{1 + \left( \frac{\rho_v}{\rho_\tau} - 1 \right) \sin^2 \varphi \sin^2 \alpha}}. \quad (162)$$

Отсюда следует, что при наблюдениях по линии, ориентированной вдоль простирания ( $\varphi = 0$ ),

$$\eta_k = 1 - \sqrt{(1 - \eta_v)(1 - \eta_\tau)} \approx (\eta_v + \eta_\tau)/2,$$

т. е. кажущаяся поляризуемость примерно равна средней поляризуемости вдоль и поперек слоистости и не зависит от удельного сопротивления и угла падения слоев.

При наблюдениях по линии, ориентированной поперек простирания слоев ( $\varphi = 90^\circ$ ), кажущаяся поляризуемость довольно сложно зависит от соотношения удельных сопротивлений слоев и угла их падения. При вертикальном падении слоев ( $\alpha = 90^\circ$ )  $\eta_k = \eta_\tau$ , при горизонтальном залегании ( $\alpha = 0$ )  $\eta_k = 1 - \sqrt{(1 - \eta_v)(1 - \eta_\tau)}$  независимо от кажущегося удельного сопротивления. Правда,  $\eta_v$  и  $\eta_\tau$ , как показано раньше, сами зависят от удельного сопротивления слоев и их толщины.

Интересно отметить, что так называемый парадокс анизотропии, известный применительно к кажущемуся удельному сопротивлению, сохраняется и в отношении кажущейся поляризуемости. Если поляризуемость вдоль слоев больше, чем поперек их, то кажущаяся поляризуемость, измеряемая в поле точечного источника тока, оказывается меньше при ориентировке линии наблюдений вдоль простирания слоев. И наоборот, кажущаяся поляризуемость, наблюдаемая вдоль простирания слоев, больше, чем вкрест простирания, если поляризуемость вдоль слоев меньше, чем поперек.

При одинаковой поляризуемости вдоль и поперек слоев анизотропия кажущейся поляризуемости отсутствует независимо от анизотропии кажущегося удельного сопротивления.

## ВЫВОДЫ

1. Экспериментальные данные позволяют обосновать исходные уравнения, с помощью которых можно вычислить поле ВП отдельного электропроводящего тела (т. е. рудного включения произвольного размера), тела вкрапленных руд или непроводящих пород. Вычисления относительно несложны, поскольку во многих случаях удастся воспользоваться известными решениями задач теории электроразведки методом сопротивлений, а также теории магниторазведки.

2. Измеряемая на практике кажущаяся поляризуемость в обстановке однородных по поляризуемости сред полностью соответствует их истинной поляризуемости, независимо от применяемой схемы расположения электродов, рельефа местности и т. д. Безрудные породы (по экспериментальным данным) обладают поляризуемостью, изменяющейся в небольших пределах, поэтому следует ожидать высокой устойчивости фоновой поляризуемости в полевых условиях.

3. Поляризуемость, создаваемая рудной вкрапленностью, в определенных пределах пропорциональна ее объемному содержанию и значительно выше поляризуемости вмещающих пород, как только вкрапленность занимает хотя бы несколько процентов объема породы. По теоретическим расчетам, согласующимся с результатами лабораторных исследований, 1% вкрапленности, уподобляемой сферическим включениям, может обусловить поляризуемость 4,5%, если измерять ее сразу после выключения тока, и примерно 3%, если измерять через 0,5 с после выключения тока. Эффект ВП, создаваемый рудными включениями, имеющими форму тонких пленок, прожилков, больше, чем при сферической форме включений.

В целом, метод ВП должен обладать высокой чувствительностью к вкрапленности электропроводящих минералов. Установленные количественные соотношения между поляризуемостью и объемным содержанием вкрапленности можно использовать при интерпретации полевых материалов.

4. Время установления ВП зависит от вида электрохимического процесса, а также от размера, формы электронного проводника и его ориентировки относительно возбуждающего поля. В качестве временного параметра выступает время максимума производной поля ВП по логарифму времени. В ранней стадии ВП (до единиц — десятков миллисекунд), когда происходит перезарядка емкости двойного электрического слоя, постоянная времени пропорциональна размеру включений. В поздней стадии, когда преобладает концентрационная поляризация, постоянная времени пропорциональна квадрату размера включения. Во всех случаях постоянная времени достаточно больших включений приближается к некоторому предельному значению, определяемому составом электронного проводника и электролита и достигающему сотен секунд и более.

Зависимость постоянной времени сфероидальных включений от их ориентировки дает основание предполагать заметные изменения временных характеристик ВП пород, содержащих пленочные и нитевидные включения электропроводящих минералов, при разном положении источника поляризующего тока. По виду временных характеристик ВП можно судить о текстуре электропроводящих включений в горных породах.

В среде, содержащей включения различного размера, последовательно происходит предельная поляризация включений, начиная с наименьших. По мере пропускания постоянного тока плотность тока внутри такой среды перераспределяется и на крупных включениях со временем может достичь уровня, необходимого для осуществления нелинейных электрохимических процессов, сопровождающихся преобразованием вещественного состава электронного проводника и электролита.

5. Метаморфические сланцы и другие слоистые породы, состоящие из нескольких различающихся по составу и взаимно чередующихся компонентов, могут обладать анизотропией поляризуемости, как только поляризуемости отдельных слоев будут различными, например за счет разного содержания электропроводящих минералов. В условиях таких пород, хотя бы и макрооднородных, наблюдается зависимость кажущейся поляризуемости от ориентировки поляризующего поля и линии наблюдений. Результаты теоретических расчетов поз-

воляют указать закономерности и пределы изменений поляризуемости в анизотропных средах. Парадокс анизотропии в применении к кажущейся поляризуемости выражается в том, что когда средняя поляризуемость вдоль слоев больше, чем поперек их, кажущаяся поляризуемость, наблюдаемая по направлению простирания слоев, меньше, чем по поперечному направлению.

## ВП ТЕЛ ШАРОВОЙ ФОРМЫ

Электропроводящая  
сфера  
в однородном поле

В отличие от условий, принятых ранее, допустим, что коэффициенты анодной и катодной поляризации  $\lambda_a$  и  $\lambda_k$  неодинаковы, и тем самым оценим эффект нелинейной вызванной поляризации (НВП). Задачу о разной анодной и катодной поляризации сферы исследовал Б. И. Геннадиник [60], но он ограничился приближенной оценкой поля ВП, показав, что она соответствует сфере, имеющей  $\lambda = (1/2)(\lambda_a + \lambda_k)$ . Л. С. Хлопонина [297] оценила роль НВП для однородного и неоднородного поляризующего поля.

Различие анодных и катодных процессов должно отразиться в граничном условии, характеризующем скачок потенциала на поверхности электронного проводника, равный э. д. с. ВП. Для упрощения теоретических выкладок ограничимся первым приближением, в котором

$$\mathcal{E}_{\text{ВП}} = U^{(1)} - U^{(2)} = \left( \frac{\lambda_a + \lambda_k}{2} - \frac{\lambda_a - \lambda_k}{2} \cos \theta \right) \frac{\partial U^{(1)}}{\partial v} \quad (163)$$

и напряженности поляризующего поля на поверхности сферы принимается значение, соответствующее одинаковой анодной и катодной поляризации. При  $r = a$

$$\partial U^{(1)} / \partial v = -E_v^{(1)} \approx DE_0 \cos \theta, \quad (164)$$

где  $D = 3\sigma_2 / [2\sigma_1 + \sigma_2 + 2\lambda_{cp}/a]$ ;  $\lambda_{cp} = (1/2)(\lambda_a + \lambda_k)$  — условные обозначения соответствуют рис. 39.

В формуле (164) напряженность поляризующего поля  $E_v$  соответствует напряженности в формуле (114) и не содержит НВП, что дает определенную погрешность, которая тем меньше, чем больше радиус сферы  $a$  и меньше коэффициент нелинейности  $\Lambda = (\lambda_a - \lambda_k) / (\lambda_a + \lambda_k)$ . При показанном на рис. 39 направлении поляризации ось  $z$  — ось симметрии сферы с координатой  $\theta = 0$  соответствует полюсу катодной части, а точка с координатой  $\theta = \pi$  — полюсу анодной части.

Второе граничное условие, отражающее непрерывность нормальной составляющей плотности тока, остается без изменений:

$$\sigma_1 \partial U^{(1)} / \partial v = \sigma_2 \partial U^{(2)} / \partial v. \quad (165)$$

В соответствии с обычным ходом решения уравнения Лапласа, используемым в теории электроразведки, искомый потенциал поляризующего поля представим в виде суммы нормального потен-

циала  $U^{(0)}$ , характеризующего поле при отсутствии сферы, и аномального  $U_{\text{ан}}$  вне и внутри сферы:

$$U^{(1)} = U^{(0)} + U_{\text{ан}}^{(1)}; \quad (166)$$

$$U^{(2)} = U^{(0)} + U_{\text{ан}}^{(2)}. \quad (167)$$

Поскольку нормальное поле однородно, то

$$U^{(0)} = +E_0 r \cos \theta = -E_0 x. \quad (168)$$

Аномальный потенциал в согласии с общим решением задачи Дирихле для сферы [274] представим в виде ряда по полиномам Лежандра  $P_n(\cos \theta)$ :

$$U_{\text{ан}}^{(1)} = \sum_{n=0}^{\infty} A_n (a/r)^{n+1} P_n(\cos \theta); \quad (169)$$

$$U_{\text{ан}}^{(2)} = \sum_{n=0}^{\infty} B_n (r/a)^n P_n(\cos \theta). \quad (170)$$

Коэффициенты  $A_n$  и  $B_n$  находят с помощью граничных условий. Подставив значения потенциалов из формул (166)–(170) в уравнение (163) и нормальных производных этих потенциалов на поверхности сферы в уравнение (165), получим следующие уравнения:

$$\sum_{n=0}^{\infty} (A_n - B_n) P_n(\cos \theta) = -\frac{\lambda_a - \lambda_k}{2} \frac{1}{3} E_0 D P_0(\cos \theta) + \frac{\lambda_a + \lambda_k}{2} E_0 D P_1(\cos \theta) - \frac{\lambda_a - \lambda_k}{2} \frac{2}{3} E_0 D P_2(\cos \theta); \quad (171)$$

$$\sum_{n=0}^{\infty} \left[ (n+1) \frac{\sigma_1}{a} A_n + n \frac{\sigma_2}{a} B_n \right] P_n(\cos \theta) = (\sigma_1 - \sigma_2) E_0 P_1(\cos \theta). \quad (172)$$

Эти уравнения должны быть справедливыми при всех значениях угла  $\theta$ , поэтому сумма множителей при полиномах Лежандра каждого порядка должна равняться нулю. Таким образом получаем  $2n$  уравнений для определений коэффициентов  $A_n$  и  $B_n$ . Решив их, получим следующие значения коэффициентов:

$$\begin{aligned} A_0 &= 0; & B_0 &= \frac{1}{3} \frac{\lambda_a - \lambda_k}{2} E_0 D; \\ A_1 &= \frac{(\sigma_1 - \sigma_2) a + \sigma_2 \frac{\lambda_a + \lambda_k}{2} D}{\sigma_2 + 2\sigma_1} E_0; & B_1 &= \frac{(\sigma_1 - \sigma_2) a - 2\sigma_1 \frac{\lambda_a + \lambda_k}{2} D}{\sigma_2 + 2\sigma_1} E_0; \\ A_2 &= -\frac{4\sigma_2}{6\sigma_2 + 9\sigma_1} \frac{\lambda_a - \lambda_k}{2} E_0 D; & B_2 &= -\frac{2\sigma_1}{2\sigma_2 + 3\sigma_1} \frac{\lambda_a - \lambda_k}{2} E_0 D; \\ A_n &= 0, \text{ если } n = 3, 4, 5 \dots & B_n &= 0, \text{ если } n = 3, 4, 5 \dots \end{aligned}$$

Подставив значения  $A_n$  и  $B_n$  в уравнения (169) и (170), получим выражения аномального потенциала вне и внутри сферы:

$$U_{ан}^{(1)} = \frac{(\sigma_1 - \sigma_2) a + \sigma_2 \frac{\lambda_a + \lambda_k}{2} D}{\sigma_2 + 2\sigma_1} E_0 \frac{a^2}{r^2} P_1(\cos \theta) - \frac{2\sigma_2 (\lambda_a - \lambda_k)}{6\sigma_2 + 9\sigma_1} E_0 D \frac{a^3}{r^3} P_2(\cos \theta); \quad (173)$$

$$U_{ан}^{(2)} = \frac{1}{3} \cdot \frac{\lambda_a - \lambda_k}{2} E_0 D - \frac{(\sigma_2 - \sigma_1) a + \sigma_1 (\lambda_a + \lambda_k) D}{\sigma_2 + 2\sigma_1} \times \\ \times E_0 \frac{r}{a} P_1(\cos \theta) + \frac{\sigma_1 (\lambda_a - \lambda_k)}{2\sigma_2 + 3\sigma_1} E_0 D \frac{r^2}{a^2} P_2(\cos \theta). \quad (174)$$

Если в формулах (173) и (174) положить  $\lambda_a = \lambda_k = 0$ , то получим аномальный потенциал первичного поля вне и внутри сферы:

$$U_{ан}^{(1)} = \frac{\sigma_1 - \sigma_2}{\sigma_2 + 2\sigma_1} E_0 \frac{a^3}{r^2} \cos \theta; \quad (175)$$

$$P_1(\cos \theta) = \cos \theta = -\frac{x}{r};$$

$$U_{ан}^{(2)} = \frac{\sigma_1 - \sigma_2}{\sigma_2 + 2\sigma_1} E_0 r \cos \theta. \quad (176)$$

Формулы (175) и (176) идентичны приводимым в учебниках электроразведки [36, 99, 160].

Разность выражений (173) и (175) дает потенциал полного поля вызванной поляризации вне сферы

$$U_n^{(1)} = \frac{\sigma_2}{\sigma_2 + 2\sigma_1} \cdot \frac{\lambda_a + \lambda_k}{2} DE_0 \frac{a^2}{r^2} P_1(\cos \theta) - \frac{2\sigma_2 (\lambda_a - \lambda_k)}{6\sigma_2 + 9\sigma_1} DE \frac{a^3}{r^3} P_2(\cos \theta), \quad (177)$$

а разность выражений (174) и (176) — потенциал полного поля ВП внутри ее

$$U_n^{(2)} = \frac{\lambda_a - \lambda_k}{6} DE_0 - \frac{\sigma_1 (\lambda_a + \lambda_k)}{\sigma_2 + 2\sigma_1} DE_0 \frac{r}{a} P_1(\cos \theta) + \\ + \frac{\sigma_1 (\lambda_a - \lambda_k)}{2\sigma_2 + 3\sigma_1} DE_0 \frac{r^2}{a^2} P_2(\cos \theta). \quad (178)$$

Направление поляриной оси было выбрано вдоль нормального поля. Изменение направления нормального поля на противоположное влечет за собой взаимную замену полюсов анодной и катодной поляризации, означающую замену координаты  $\theta$  на  $\pi - \theta$ . При этом

$$P_1(\cos \theta) = -P_1(\cos [\pi - \theta]);$$

$$P_2(\cos \theta) = P_2(\cos [\pi - \theta]),$$

т. е. полином Лежандра 1-го порядка меняет свой знак, а полином 2-го порядка сохраняет его. В силу этого в каждой точке пространства полусумма потенциалов полного поля ВП, соответствующих

обоим направлениям поляризующего тока, содержит полиномы только четного порядка. Она характеризует потенциал поля НВП вне и внутри сферы

$$U_{НВП}^{(1)} = -\frac{2\sigma_2 (\lambda_a - \lambda_k)}{6\sigma_2 + 9\sigma_1} DE_0 \frac{a^3}{r^3} P_2(\cos \theta); \quad (179)$$

$$U_{НВП}^{(2)} = \frac{1}{3} \cdot \frac{\lambda_a - \lambda_k}{2} DE_0 + \frac{\sigma_1 (\lambda_a - \lambda_k)}{2\sigma_2 + 3\sigma_1} DE_0 \frac{r^2}{a^2} P_2(\cos \theta) \quad (180)$$

Поле НВП сохраняет знак при изменении направления поляризующего тока. Знак определяется преобладанием анодной или катодной поляризации. В центре сферы он положителен, если  $\lambda_a > \lambda_k$ , и отрицателен, если  $\lambda_a < \lambda_k$ .

Другая часть полного поля поляризации, вычисляемая как полуразность значений этого поля при разном направлении тока, изменяет знак соответственно поляризующему току. Эта часть характеризует линейную составляющую ВП, которую будем называть просто полем ВП. Потенциал поля ВП, определяемый таким образом, выражается через полиномы Лежандра только нечетного порядка. Вне сферы он равен

$$U_{ВП}^{(1)} = \frac{\sigma_2}{\sigma_2 + 2\sigma_1} \cdot \frac{\lambda_a + \lambda_k}{2} DE_0 \frac{a^2}{r^2} P_1(\cos \theta), \quad (181)$$

а внутри сферы

$$U_{ВП}^{(2)} = -\frac{2\sigma_1}{\sigma_2 + 2\sigma_1} \cdot \frac{\lambda_a + \lambda_k}{2} DE_0 \frac{r}{a} P_1(\cos \theta). \quad (182)$$

Если в формулах (181) и (182) принять  $\lambda_a = \lambda_k = \lambda$  и учесть, что  $P_1(\cos \theta) = \cos \theta$ , то они совпадут с полученными Ю. П. Булашевичем [34].

Графики потенциалов ВП и НВП по нескольким профилям, один из которых проходит через центр сферы, приведены на рис. 44. При вычислениях принято, что  $\sigma_2 = 20\sigma_1$ ,  $\lambda_a = 10$  см,  $\lambda_k = 60$  см,  $a = 5$  см,  $DE_0 = 1^*$ .

Потенциал ВП вне сферы имеет структуру, характерную для дипольного источника тока, а потенциал НВП — для квадрупольного источника. При этом структура потенциала поля НВП аналогична структуре составляющей напряженности поля ВП, параллельной поляризующему току. Это легко объяснить, сопоставив член формулы (179), зависящий от координат точки наблюдения,

$$\frac{2}{r^3} P_2(\cos \theta) = \frac{3x^2 - r^2}{r^5}, \text{ где } x = -r \cos \theta,$$

с соответствующей частью выражения напряженности поля ВП, получаемого при дифференцировании формулы (181)

$$-\frac{d}{dx} \left[ \frac{P_1(\cos \theta)}{r^2} \right] = -\frac{d}{dx} \left[ \frac{x}{r^3} \right] = \frac{3x^2 - r^2}{r^5}.$$

\* Эти данные примерно соответствуют условиям моделирования поля НВП, осуществленного в ВИТР А. А. Смирновым.

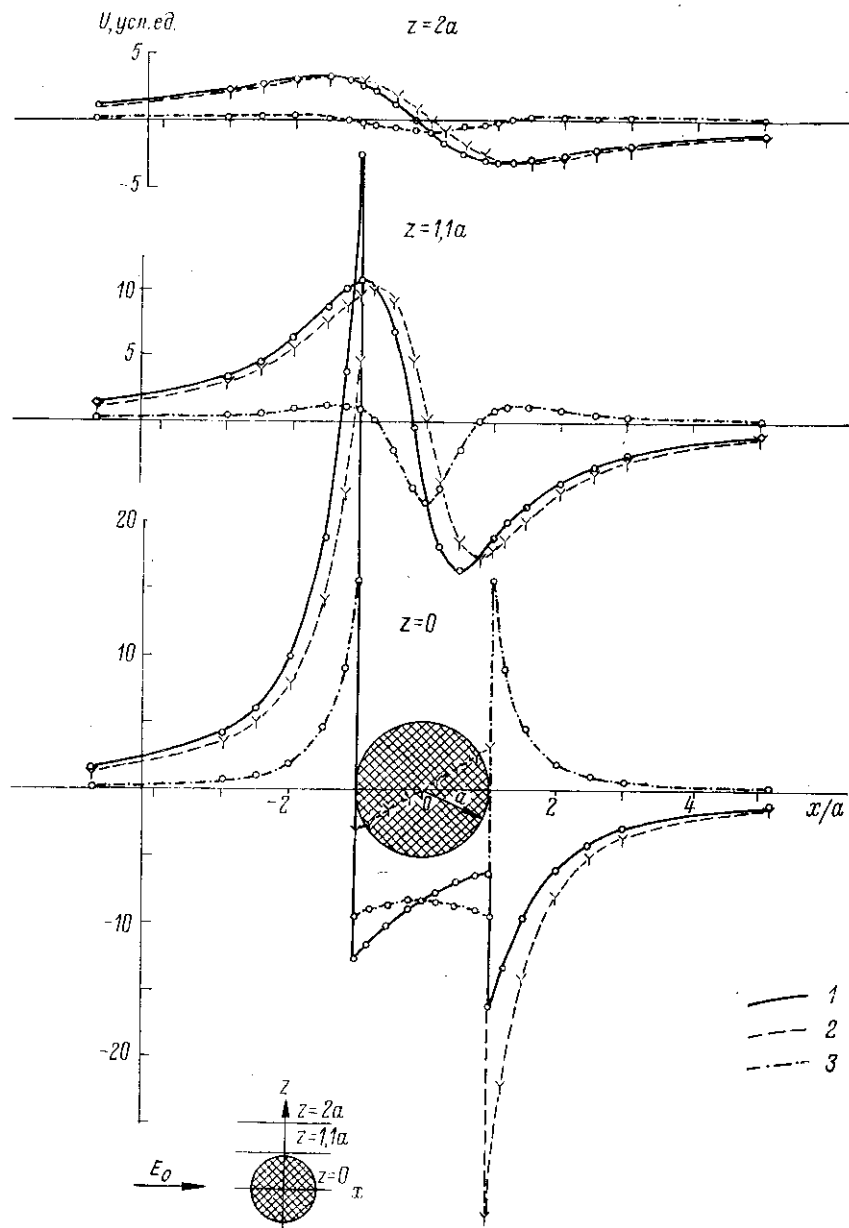


Рис. 44. Теоретические графики потенциалов суммарной поляризации 1, линейной 2 и нелинейной ВП 3 в случае электропроводящей сферы, обладающие большей катодной поляризацией по сравнению с анодной.

Отношение потенциала поля НВП к указанной составляющей напряженности поля ВП не зависит от координат точки наблюдения и определяется только параметрами сферы: коэффициентами анодной и катодной поляризации, радиусом, соотношением электропроводностей сферы и вмещающей среды:

$$\gamma = \frac{U_{\text{НВП}}^{(1)}}{E_{\text{ВП}x}^{(1)}} = \frac{\lambda_a - \lambda_k}{\lambda_a + \lambda_k} \cdot \frac{1 + 2p}{2 + 3p} \cdot \frac{2}{3} a. \quad (183)$$

Знак  $\gamma$  положительный, если  $\lambda_a > \lambda_k$ , и отрицательный, если  $\lambda_a < \lambda_k$ . В полевых условиях [136] можно установить знак потенциала поля НВП. Выше приведены экспериментальные данные, показывающие, что для сульфидов, особенно для галенита и халькопирита, характерно преобладание катодной поляризации над анодной, в то время как для графита характерно преобладание анодной поляризации над катодной. Эти данные служат предпосылкой создания нового метода НВП, способного разделять аномалии ВП, порождаемые полиметаллическими рудами и графитизированными породами [144, 146, 203].

Переходную характеристику полной э. д. с. ВП найдем из формул (163) и (164) тем же способом, которым получено выражение (125):

$$F_{\text{п}}(T) = \frac{\lambda_{a\infty} F_a(T) [1 - \cos \theta] + \lambda_{k\infty} F_k(T) [1 + \cos \theta]}{\lambda_{a\infty} [1 - \cos \theta] + \lambda_{k\infty} [1 + \cos \theta]} \times \\ \times \frac{(2\sigma_1 + \sigma_2) a + \sigma_2 (\lambda_{a\infty} + \lambda_{k\infty})}{(2\sigma_1 + \sigma_2) a + \sigma_2 [\lambda_{a\infty} F_a(T) + \lambda_{k\infty} F_k(T)]}, \quad (184)$$

где  $F_a(T)$ ,  $F_k(T)$  — переходные характеристики анодного и катодного процессов;  $T$  — время, отсчитанное от момента включения постоянного тока.

Плотность поляризующего тока считается небольшой, а коэффициенты  $\lambda_a$  и  $\lambda_k$  не зависящими от нее, поэтому к выражению (184) применимы преобразование (29), дающее кривую спада ВП после импульса постоянного тока, и интеграл Дюамеля (38), дающий напряжение ВП на переменном токе.

Из формулы (184) видно, что при наличии нелинейной составляющей временная зависимость э. д. с. ВП в разных точках поверхности сферы неодинакова: со временем перераспределяются электрические заряды вдоль поверхности. В центре сферы накапливается заряд, создающий потенциал, который, как видно из формулы (180), при  $r = 0$

$$U_{\text{НВП}}^{(2)} = \frac{\lambda_a - \lambda_k}{6} D E_0. \quad (185)$$

Знак потенциала НВП определяется соотношением анодной и катодной поляризации. Если анодная поляризация преобладает ( $\lambda_a > \lambda_k$ ), то потенциал НВП в центре сферы положительный, а вне сферы в точках, расположенных в экваториальной плоскости

$[\theta = \pi/2; \cos \theta = 0; P_1(\cos \theta) = 0; P_2(\cos \theta) = 1/2]$ , отрицательный, равный

$$U_{\text{НВП}}^{(1)} = -\frac{\sigma_2(\lambda_a - \lambda_k)}{6\sigma_2 + 9\sigma_1} \cdot \frac{a^3}{r^3} DE_0. \quad (186)$$

В результате в экваториальной плоскости сферы создается ток, вытекающий из ее центра.

Если преобладает катодная поляризация ( $\lambda_k > \lambda_a$ ), то потенциал НВП в центре сферы отрицательный и по экваториальной плоскости течет ток в направлении центра сферы. При переменном токе различие анодной и катодной поляризации приводит к появлению выпрямленной составляющей тока, растекающейся по экваториальной плоскости.

В предыдущем разделе показано, что напряженность поля ВП пропорциональна концентрации сферических включений в единице объема породы  $\xi$ . Поскольку внешний потенциал поля НВП пропорционален напряженности поля линейной ВП, постольку он тоже пропорционален концентрации включений. В рассматриваемом случае  $E_{\text{ВП.х}} = \eta_{\text{ан}} E_{\text{пр}} = \eta^* \vartheta E_{\text{пр}}$ . При  $\sigma_2 \gg \sigma_1$  и  $\xi < 0,3$   $\eta^* \approx \beta_c \xi$ . Поэтому из формулы (183) имеем

$$U_{\text{НВП}}^{(1)} = \gamma \eta_{\text{ан}} E_{\text{пр}} \approx \frac{\lambda_a - \lambda_k}{\lambda_a + \lambda_k} \cdot \frac{a\beta_c \xi}{3} \vartheta E_{\text{пр}}. \quad (187)$$

Поле НВП, как и поле линейной ВП, возрастает с увеличением объемной концентрации рудной вкрапленности, но в отличие от поля ВП оно, кроме того, пропорционально абсолютному размеру включений, а также относительной разности анодной и катодной поляризации. Вследствие этого по данным НВП можно с большей надежностью судить об эффективном размере включений и, кроме того, учитывая знак НВП, об их минеральном составе.

Электропроводящая  
сфера в поле точечного  
источника тока

В этой задаче, как и везде в дальнейшем, различие анодной и катодной поляризации не учтено и использован единый коэффи-

циент  $\lambda$ . ВП вмещающей среды принята равной нулю. Точечный источник тока расположен вне сферы на расстоянии от ее центра, равном  $d$ . Принятые обозначения пояснены на рис. 45.

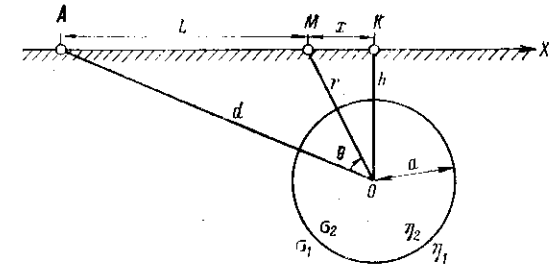
Ход вычислений во многом сходен с решением предыдущей задачи. Вновь использованы формулы (166), (167) и (169), (170), но нормальный потенциал поля точечного источника иной:

$$U^{(0)} = \frac{I}{4\pi\sigma_1} \cdot \frac{1}{L}, \quad (188)$$

где  $L$  — расстояние между источником тока и точкой наблюдений.

Использованы граничные условия, перечисленные в начале гл. II, а функция  $1/L$ , входящая в выражение (188), для точек

Рис. 45. К выводу формулы для поля ВП электропроводящей сферы, помещенной в поле точечного источника тока.



в окрестности сферы ( $r < d$ ) разложена в ряд по полиномам Лежандра:

$$U^0 = \frac{I}{4\pi\sigma_1} \sum_{n=0}^{\infty} \frac{r^n}{d^{n+1}} P_n(\cos \theta) \quad (189)$$

В итоге потенциал поляризирующего поля вне сферы

$$U^{(1)} = \frac{I}{4\pi\sigma_1} \left[ \frac{1}{L} + \sum_{n=0}^{\infty} \frac{n \left( p + n \frac{\lambda}{a} \right) - n}{(n+1) \left( p + n \frac{\lambda}{a} \right) + n} \cdot \frac{a^{2n+1}}{d^{n+1} r^{n+1}} P_n(\cos \theta) \right], \quad (190)$$

внутри сферы

$$U^{(2)} = \frac{I}{4\pi\sigma_1} \left[ \frac{1}{L} + \sum_{n=0}^{\infty} \frac{n \left[ p - (n+1) \frac{\lambda}{a} \right] - n}{(n+1) \left( p + n \frac{\lambda}{a} \right) + n} \cdot \frac{r^n}{d^{n+1}} P_n(\cos \theta) \right]. \quad (191)$$

Положив в формулах (190) и (191)  $\lambda = 0$ , получим совпадающие с выведенными А. И. Заборовским [98] выражения потенциала первичного поля вне и внутри сферы при источнике тока вне сферы:

$$U_0^{(1)} = \frac{I}{4\pi\sigma_1} \left[ \frac{1}{L} + \sum_{n=0}^{\infty} \frac{n(p-1)}{(n+1)p+n} \cdot \frac{a^{2n+1}}{d^{n+1} r^{n+1}} P_n(\cos \theta) \right]; \quad (192)$$

$$U_0^{(2)} = \frac{I}{4\pi\sigma_1} \left[ \frac{1}{L} + \sum_{n=0}^{\infty} \frac{n(p-1)}{(n+1)p+n} \cdot \frac{r^n}{d^{n+1}} P_n(\cos \theta) \right]. \quad (193)$$

Вычитая из потенциала поляризирующего поля потенциал первичного поля, согласно формуле (82) получаем потенциал поля ВП вне и внутри сферы:

$$U_{ВП}^{(1)} = \frac{I}{4\pi\sigma_1} \sum_{n=0}^{\infty} \frac{n^2 (2n+1) \frac{\lambda}{a} \cdot \frac{a^{2n+1}}{d^{n+1} r^{n+1}} P_n(\cos \theta)}{[(n+1)p+n] \left[ (n+1) \left( p + n \frac{\lambda}{a} \right) + n \right]}; \quad (194)$$

$$U_{ВП}^{(2)} = - \frac{I}{4\pi\sigma_1} \sum_{n=0}^{\infty} \frac{n(n+1)(2n+1)p \frac{\lambda}{a} \cdot \frac{r^n}{d^{n+1}} P_n(\cos \theta)}{[(n+1)p+n] \left[ (n+1) \left[ \left( p + n \frac{\lambda}{a} \right) + n \right] \right]}. \quad (195)$$

Графики потенциала поля ВП при  $\sigma_2 \gg \sigma_1$  и  $\sigma_2 = \sigma_1$  по линии, проходящей через центр сферы, даны на рис. 46. С уменьшением электропроводности сферы потенциал ВП вне сферы резко падает.

На рис. 47 приведены экспериментальный график  $\Delta U_{ВП}$  1 и теоретические  $U_{ВП}$  2 и  $\Delta U_{ВП}$  3 по профилю, проходящему над сферой. В опытах использован железный шар с радиусом 5 см, помещенный в воду на глубину 9,4 см. Положительный токовый электрод А был расположен в 40 см от эпицентра шара. Второй токовый электрод находился на «бесконечности». Разнос измерительных электродов составлял 5 см.

Для вычислений  $U_{ВП}$  использована формула (194), причем брали лишь два члена ряда: с  $n = 1$  и  $n = 2$  (при  $n = 0$  член ряда равен нулю) — и считали, что  $\sigma_2 \gg \sigma_1$ . Значение силы тока соответствовало условиям опыта ( $I = 0,1$  А). Граница воздух—вода учтена путем удвоения правой части формулы (194). Из теоретического графика  $\Delta U_{ВП}$  графическим способом вычислены разности потенциалов в соответствии с положением измерительных электродов в опыте.

Коэффициент  $\lambda$ , чтобы амплитуды рассчитанного и экспериментального графиков  $\Delta U_{ВП}$  совпали, взяли равным 1 см. Такое значение  $\lambda$  не противоречит результатам лабораторных измерений э. д. с. ВП железа в том же растворе. Как указано в табл. 7, для железа  $\kappa = 30 \text{ Ом} \cdot \text{м}^2$ . Удельное сопротивление воды составляло примерно  $100 \text{ Ом} \cdot \text{м}$ , так что  $\lambda = \kappa / \rho_s = 0,03 \text{ м} = 3 \text{ см}$ . Но при моделировании шар долго находился в воде, подвергся длительному воздействию тока, несколько окислился и стал менее восприимчивым к поляризации током.

Небольшое смещение экспериментального графика  $\Delta U_{ВП}$  влево относительно теоретического можно объяснить тем, что в расчетах не учитывалась разница анодной и катодной поляризации. На самом деле анодная поляризация железа отсутствовала и э. д. с. ВП была сосредоточена на катодной части шара, обращенной к положительному питающему электроду.

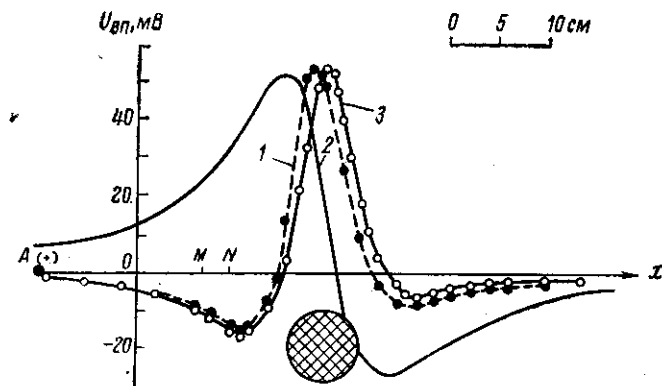
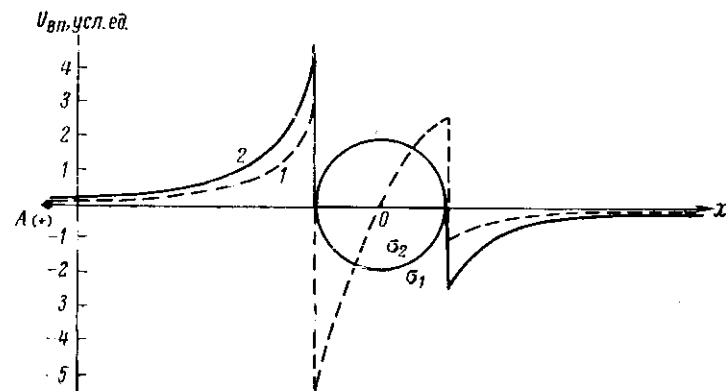


Рис. 46. Теоретические графики потенциала ВП вне и внутри электропроводящей сферы.

1 —  $\sigma_1 = \sigma_2$ ; 2 —  $\sigma_2 \gg \sigma_1$ .

Вертикальный масштаб графика 2 уменьшен в 5 раз по сравнению с масштабом графика 1.

Рис. 47. Сопоставление экспериментального графика  $\Delta U_{ВП}$  (1) с теоретическими  $U_{ВП}$  (2) и  $\Delta U_{ВП}$  (3).

В заключение отметим, когда  $d \gg a$ , можно ограничиться вычислением единственного члена ряда при  $n = 1$ . В этом случае сфера находится в однородном поле, напряженность которого

$$E_0 = \frac{I}{4\pi\sigma_1} \cdot \frac{1}{d^2}. \quad (196)$$

Объемно  
поляризованный шар  
в поле точечного  
источника тока

Рассмотрим сначала решение задачи о шаре, наделенном поляризуемостью  $\eta$  и по величине электропроводности не отличающемся от вмещающей среды, считаемой неполяризуемой. Тогда в качестве исходного выступает интегро-дифференциальное уравнение

$$U_{ВП} = \frac{\eta}{4\pi} \int \frac{1}{R} \cdot \frac{\partial U_0}{\partial \nu} dS + \frac{\eta}{4\pi} \int \frac{1}{R} \cdot \frac{\partial U_{ВП}}{\partial \nu} dS, \quad (197)$$

получаемое из формул (98) и (82).

Решение этого уравнения, подробно изложенное в статье автора [126], в конечном итоге приводит к следующему выражению потенциала поля ВП внутри шара при источнике тока, находящемся вне шара:

$$U_{\text{ВП}}^{(2)} = \frac{I}{4\pi\sigma_1} \sum_{n=0}^{\infty} \frac{n\eta}{2n+1-n\eta} \cdot \frac{r^n}{d^{n+1}} P_n(\cos\theta). \quad (198)$$

Выражение потенциала поля ВП вне шара при источнике тока, находящемся тоже вне шара, легко получить из формулы (198), применив преобразование Кельвина [282], дающее инверсию точек из внутренней области шара во внешнюю путем замены  $r^n$  на  $(a/r)(a^2/r)^n$ . В итоге

$$U_{\text{ВП}}^{(1)} = \frac{I}{4\pi\sigma_1} \sum_{n=0}^{\infty} \frac{n\eta}{2n+1-n\eta} \cdot \frac{a^{2n+1}}{r^{n+1}d^{n+1}} P_n(\cos\theta). \quad (199)$$

Сопоставляя выражение (198) с аномальной частью потенциала первичного поля в уравнении (193) и формулу (199) с потенциалом вне сферы (192), можно убедиться, что они полностью совпадают, если принять  $\eta = (p-1)/p = (\sigma_1 - \sigma_2)/\sigma_1$ .

Эта математическая аналогия не является специфичной для шара и может быть широко использована в общей теории методов электроразведки. С этой точки зрения формулы (198) и (199) служат примерами «интегрального» решения задач об аномалиях постоянного тока, создаваемых проводящей или непроводящей сферой. В сложном случае тел произвольной формы, когда решение уравнения Лапласа становится затруднительным, интегро-дифференциальное уравнение (197) с учетом указанной аналогии может служить исходным для составления программы вычислений на ЭВМ.

Если источник тока находится в центре шара ( $d=0$ ), то решение уравнения (197) дает следующее выражение потенциала поля ВП внутри шара [126]:

$$U_{\text{ВП}}^{(2)} = \frac{I}{4\pi\sigma_2} \cdot \frac{\eta}{1-\eta} \left[ \frac{1}{L} - \frac{1}{a} \right]. \quad (200)$$

Если принять  $a \gg L$ , то получим выражение (109) для однородной среды. Напряженность поля ВП внутри шара определим путем дифференцирования формулы (200):

$$E_{\text{ВП}}^{(2)} = -\frac{\partial U_{\text{ВП}}^{(2)}}{\partial L} = \frac{I}{4\pi\sigma_2} \cdot \frac{\eta}{1-\eta} \cdot \frac{1}{L^2}. \quad (201)$$

Независимо от радиуса шара  $a$  напряженность поля ВП внутри шара при источнике тока в центре шара полностью совпадает с выражением для однородной бесконечной среды. До сих пор предполагалось, что электропроводность шара не отличается от электропроводности вмещающей среды, которая сама не поляризуется.

Общее решение задачи о поле ВП при любых значениях электропроводности и поляризуемости шара и вмещающей среды находим путем, использованным при выводе формулы (109). Сначала из выражения первичного поля заменой электропроводности шара и вмещающей среды на фиктивные значения, указанные в формуле (88), определяем поляризующее поле. Затем по формуле (82) находим поле ВП как разность поляризующего и первичного полей.

Такие преобразования формулы (192) приводят к следующему выражению потенциала поля ВП вне шара при источнике тока внутри шара:

$$U_{\text{ВП}}^{(1)} = \frac{I}{4\pi\sigma_1^*} \left\{ \frac{\eta_1}{L} + \sum_{n=0}^{\infty} \left[ \frac{\eta_1 n (p^* - 1)}{(n+1)p^* + n} + \frac{(\eta_2 - \eta_1)(2n+1)np^*}{[(n+1)p^* + n][(n+1)p + n]} \right] Y_n \right\}, \quad (202)$$

где  $p^* = \frac{\sigma_1^*}{\sigma_2^*} = p \frac{1-\eta_1}{1-\eta_2}$ ;  $\sigma_1^* = \sigma_1(1-\eta_1)$ ;

$$Y_n = \frac{a^{2n+1}}{d^{n+1}r^{n+1}} P_n(\cos\theta). \quad (203)$$

Выражение потенциала поля ВП внутри шара при источнике тока вне шара получаем тем же способом из формулы (193). При этом по сравнению с формулой (192) меняется лишь выражение  $Y_n$ . Взамен формулы (203) имеем

$$Y_n = \frac{r^n}{d^{n+1}} P_n(\cos\theta). \quad (204)$$

Выражение потенциала поля ВП вне шара при источнике тока внутри шара отличается от предыдущего только заменой в функции  $Y_n$   $r$  на  $d$  и  $d$  на  $r$ . Справедливость замены вытекает из принципа взаимности, означающего сохранение потенциала при взаимной замене мест источника тока и точки наблюдения. В итоге имеем

$$Y_n = \frac{d^n}{r^{n+1}} P_n(\cos\theta). \quad (205)$$

Наконец, выражение потенциала поля ВП внутри шара при источнике тока, расположенном тоже внутри его, получаем с помощью преобразования Кельвина:

$$Y_n = \frac{d^n r^n}{a^{2n+1}} P_n(\cos\theta). \quad (206)$$

Зависимость потенциала ВП от электрических свойств шара для всех четырех случаев, отображаемых формулами (202)–(206), одинаковая.

Следует обратить внимание, что аномальный потенциал ВП равен нулю, когда в центре шара находится точка наблюдения

( $r = 0$ ) или источник тока ( $d = 0$ ). Последнее имеет важное практическое значение: какими бы ни были свойства шара (если источник тока находится в его центре), вне шара поле ВП зависит только от свойств вмещающей среды. По этой причине приэлектродные зоны не могут создавать аномалии ВП.

Интерпретация полевых материалов в методе ВП основана, прежде всего, на анализе кажущейся поляризуемости, поскольку поведение потенциала и напряженности поля ВП в значительной мере определяется значением электропроводности пород.

Профилирование работ токовые и измерительные электроды располагают вне поляризуемого объекта.

В качестве исходных для вычисления аномалий кажущейся поляризуемости возьмем выражения  $\rho_k$ , даваемые в теории электроразведки [98, 99]. Влияние границы земля—воздух учитывается путем удвоения значения аномалии, для потенциал-установки

$$\rho_k = \rho_1 \left[ 1 + 2L \sum_{n=1}^{\infty} q_n Y_n \right] \quad (207)$$

и для градиент-установки

$$\rho_k = \rho_1 \left[ 1 + 2L^2 \sum_{n=1}^{\infty} q_n Y'_n \right], \quad (208)$$

$$\text{где } q_n = \frac{n(p-1)}{(n+1)p+n}; \quad Y_n = \frac{a^{2n+1}}{d^{n+1}r^{n+1}} P_n(\cos \theta); \quad Y'_n = -\frac{\partial Y_n}{\partial L}.$$

Для вычислений аномальной кажущейся поляризуемости используем формулу (149), в итоге получаем для потенциал-установки

$$\eta_{ан} = \eta_k - \eta_1 = (1 - \eta_1) \frac{2L \sum_{n=1}^{\infty} g_n Y_n}{1 + 2L \sum_{n=1}^{\infty} q_n^* Y_n}, \quad (209)$$

для градиент-установки

$$\eta_{ан} = (1 - \eta_1) \frac{2L^2 \sum_{n=1}^{\infty} g_n Y'_n}{1 + 2L^2 \sum_{n=1}^{\infty} q_n^* Y'_n}, \quad (210)$$

$$\text{где } q_n^* = \frac{n(p^*-1)}{(n+1)p^*+n}; \quad p^* = p \frac{1-\eta_1}{1-\eta_2};$$

$$g_n = q_n^* - q_n = \frac{(2n+1)np(\eta_2 - \eta_1)}{[(n+1)p+n][(n+1)p^*+n](1-\eta_2)}.$$

Из формул (209) и (210) следует: если поляризуемости шара и вмещающей среды равны ( $\eta_2 = \eta_1$ ), то  $g_n = 0$  и аномальная

кажущаяся поляризуемость равна нулю, независимо от соотношения электропроводностей  $p$  и положения электродов, т. е. неоднородность пород по электропроводности не может создать аномалий ВП. Тот же вывод для тел любой формы непосредственно вытекает из формулы (149).

Аномалии  $\eta_k$  и  $\rho_k$  в рассматриваемой задаче определяются одинаковыми геометрическими факторами, и их форма сходна. Более того, можно путем несложных пересчетов использовать сделанные ранее расчеты  $\rho_k$  для получения графиков  $\eta_{ан}$ .

Н. П. Григорьева [80] вычислила аномалии  $\rho_k$  для идеально проводящего шара. При этом было принято, что  $\rho_2 \ll \rho_1$ ,  $q_n = -1$  и

$$\rho_k = \rho_1(1 - W), \quad (211)$$

где для потенциал-установки

$$W = 2L \sum_{n=1}^{\infty} Y_n, \quad (212)$$

для градиент-установки

$$W = 2L^2 \sum_{n=1}^{\infty} Y'_n. \quad (213)$$

В формулах (209) и (210) главную роль играет член с  $n = 1$ , и можно показать, что для точек наблюдения, не очень близких к поверхности шара, достаточная для практики точность обеспечивается при приведении этих формул к следующему более простому виду:

$$\eta_{ан} \approx \frac{g_1 W}{1 + q^* W}. \quad (214)$$

С помощью таблиц значений  $\rho_k/\rho_1$  для заданного набора разносов электродов, радиусов и глубин шара вычислены значения  $W = 1 - \rho_k/\rho_1$  и далее по формуле (214) аномальная кажущаяся поляризуемость. Результаты расчетов распространены на любые соотношения глубин и радиусов. В рассматриваемом упрощении \* интенсивность аномалии ВП над шаром пропорциональна не только  $g_1$ , но и отношению куба радиуса шара к кубу глубины его центра, так что

$$\eta_{ан} \approx \frac{2g_1(a^3/h^3)F}{1 + 2q^*(a^3/h^3)F}; \quad (215)$$

$$F = (h^3/2a^3)W. \quad (216)$$

Поскольку  $W$  для определенного набора разносов электродов были уже известны, то для них по формуле (216) вычислены значения  $F$ .

\* Оно означает, что первичное поле в районе шара принято однородным и равным по значению и направлению истинному полю в центре шара [формула (196)]. Поле ВП шара уподоблено полю диполя, расположенного в центре шара и ориентированного вдоль первичного поля.

Знаменатель дроби в формуле (215), как правило, близок к единице, поэтому форма графиков  $F$  и  $\eta_{ан}$  сходна, различаются лишь их вертикальные масштабы. Но масштаб  $\eta_{ан}$  зависит от электрических свойств шара, его радиуса и соотношения разностей электродов с глубиной шара, а аргументами функции  $F$  являются только соотношение разностей и глубины шара и положение электродов относительно шара. Поэтому анализировать роль разностей электродов и структуру аномалий удобнее на графиках  $F$  (рис. 48).

В случае профилирования с двухэлектродной потенциал-установкой при разностях  $L \leq 0,75h$  над центром шара располагается максимум  $F$ , а при больших разностях — минимум  $F$ , сопряженный с двумя максимумами по обеим сторонам минимума (рис. 48, а). Точка записи для потенциал-установки отнесена к середине  $AM$ . Максимум  $F$  определяется разностью электродов, который является оптимальным при  $L \approx 0,75h$ , тогда  $F \approx 0,5$ . При большем или меньшем разности  $F$  быстро падает (рис. 48, а, график 1).

В случае профилирования с трехэлектродной градиент-установкой максимум  $F$  смещается от эпицентра шара в сторону, противоположную местонахождению токового электрода. Помимо основного, имеется второй максимум  $F$ , менее интенсивный и четко проявляющийся лишь при разности  $L \approx 2h$  (рис. 48, б). При всех разностях основной максимум сопряжен с минимумом  $F$ , расположенным по другую сторону от эпицентра шара. При больших разностях второй максимум исчезает, основной оказывается над центром шара, а по обе стороны от него симметрично располагаются два минимума, амплитуда которых в 5 раз меньше, чем амплитуда максимума. Максимум  $F$  монотонно возрастает с увеличением разности и при  $L > h$  приближается к асимптотическому значению  $F = 1$  (рис. 48, в, график 2).

Таким образом, при достаточном разности аномалия ВП для градиент-установки в 2 раза больше предельной, соответствующей точно выбранному оптимальному разности потенциал-установки, и не зависит от конкретной величины разности. Это делает градиент-установку более удобной для проведения поисковых работ. При детализации обнаруженных аномалий можно использовать и потенциал-установку с несколькими разностями электродов, чтобы по зависимости аномалии ВП от разности электродов оценить глубину источника аномалии.

Распространенная в США, Канаде и других странах трехэлектродная установка Гуммеля, в которой расстояния между электродами равны, по своим качествам является промежуточной между потенциал- и градиент-установкой с малым разностью измерительных электродов \*. Графики  $F$  для профилирования с уста-

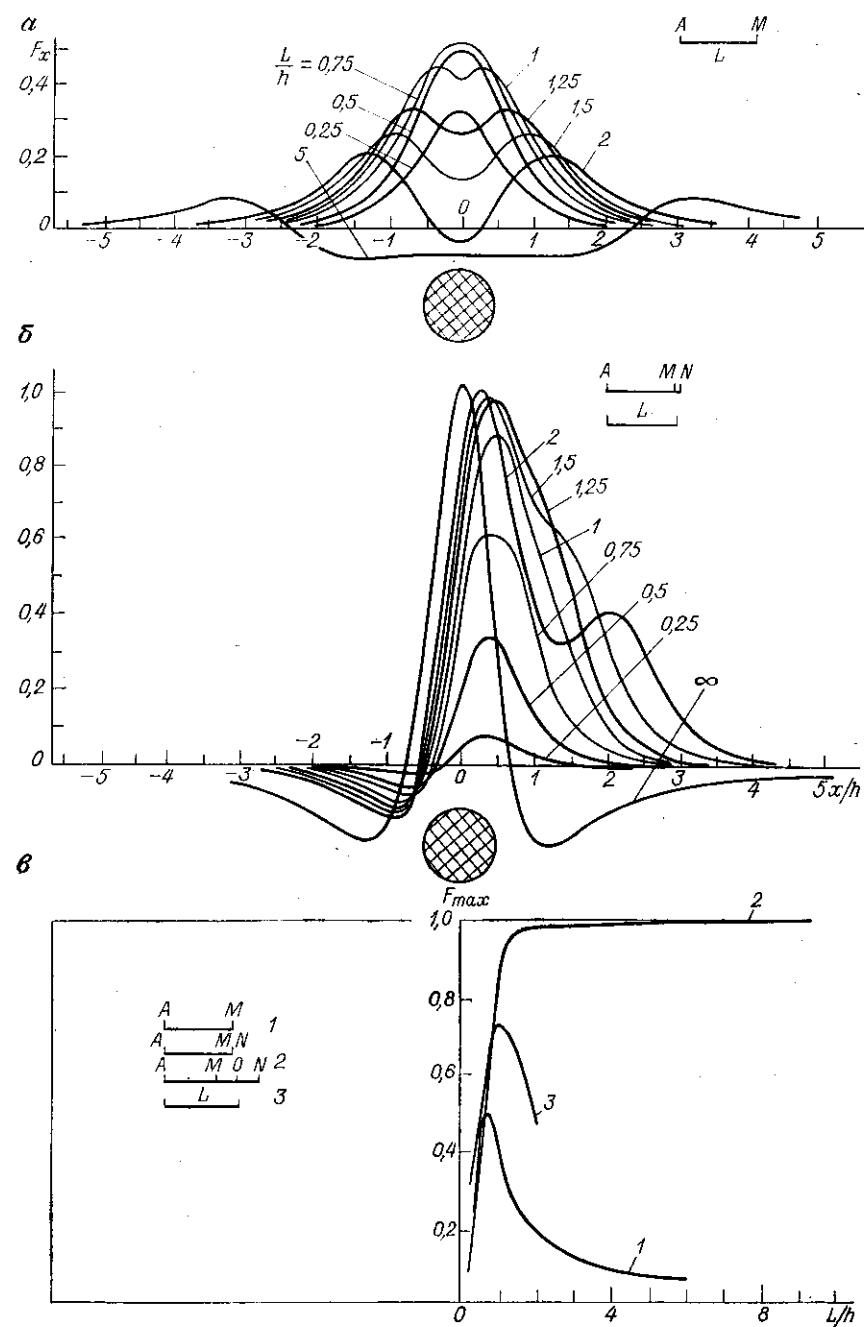


Рис 48. Графики  $F_x$  для профилирования над шаром.  
а — двухэлектродная потенциал-установка; б — трехэлектродная градиент-установка;  
в — зависимость интенсивности максимума  $F$  от разности электродов.  
1 — для двухэлектродной потенциал-установки; 2 — для трехэлектродной градиент-установки; 3 — для трехэлектродной установки Гуммеля с равным расстоянием между электродами  $AM = MN$ .

\* Градиент-установка с малым разностью измерительных электродов в зарубежной литературе называется установкой Шлюмберже.

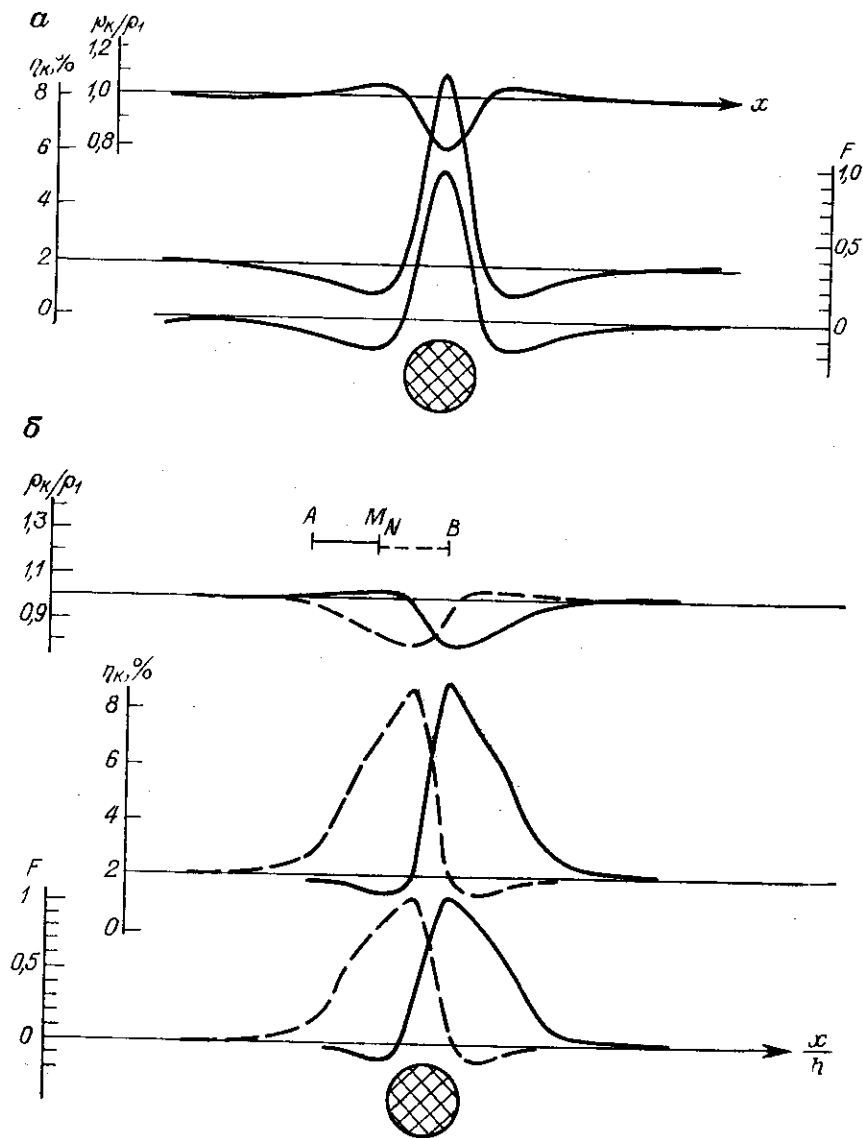


Рис. 49. Графики  $\eta_k$ ,  $\rho_k/\rho_1$  и  $F$  над шаром для установок срединного градиента (а) и комбинированного профилирования (б).  
 $\eta_1 = 2\%$ .

новкой Гуммеля приведены в статье Г. Сигела [404], соответствующая им зависимость максимальных значений  $F$  от разноса  $AO$  \* показана на рис. 48, в (график 3).

\* Буквой  $O$  обозначен центр измерительной линии  $MN$ .

Из приведенных на рис. 48 данных следует, что увеличение разноса измерительных электродов приводит к уменьшению максимального значения аномалии ВП, особенно значительному, когда  $AO > h$  и  $MN > h$ . Наиболее узкой аномалия ВП оказывается при измерении так называемых срединных градиентов, т. е. в средней части между токовыми электродами, остающимися в процессе измерений неподвижными; тогда требуются разносы  $MN \leq h$ . При профилировании с относительно небольшими разносами, например с  $AO = h$ , аномалия в несколько раз шире, чем при установке срединного градиента, и допустимы несколько большие разносы  $MN$ .

Зависимость ширины аномалии от разноса электродов следует учитывать и при оценке возможности разделения аномалий, создаваемых близко расположенными телами. Очевидно, такие тела различить легче с установкой срединного градиента, чем с установками профилирования при относительно небольших разносах  $AO$ .

Форма графиков  $F$  над шаром для установок срединного градиента и комбинированного трехэлектродного профилирования \* при  $AO = 1,25h$  дана на рис. 49. Там же показаны графики  $\eta_k$  и  $\rho_k$ , соответствующие  $\eta_1 = 2\%$ ,  $\eta_2 = 30\%$ ,  $h = 1,6a$ ,  $\rho_2 = 0,2\rho_1$ ,  $MN \ll h$ . Как видим, форма графиков  $F$  и  $\eta_{ан}$  весьма сходна, а графики  $\rho_k$  являются как бы зеркальным отражением графиков  $\eta_{ан}$ .

Над хорошо проводящим и поляризующимся шаром наблюдаются для установки срединного градиента максимум  $\eta_k$  и минимум  $\rho_k$ , для установки комбинированного профилирования — «обратное» пересечение графиков  $\eta_k$  и «прямое» пересечение графиков  $\rho_k$ . Различие между формой  $F$  и  $\eta_{ан}$  сводится к изменению соотношения экстремумов. Влияние аномалии  $\rho_k$ , отражаемое знаменателем дроби в формуле (215), приводит к относительному росту максимумов  $\eta_k$  и уменьшению минимумов  $\eta_k$  по сравнению с графиками  $F$ . Максимум  $\eta_k$  значительно больше минимума  $\eta_k$ , особенно если над телом наблюдается минимум  $\rho_k$ , поэтому в полевых условиях четкие минимумы  $\eta_k$  чаще всего не наблюдаются.

Измерения поля ВП  
при неподвижном  
источнике тока

Функция  $F^{**}$  рассчитана  
Л. С. Хлопониной для разных рас-  
стояний от источника тока  $A$  до  
эпицентра шара. При этом при-

нято, что измерительные электроды находятся на прямой, проходящей через источники тока и эпицентр шара, и их разнос мал.

Как видно из рис. 50, вид графиков  $F$  существенно зависит от положения источника тока относительно шара. Если электрод  $A$  расположен над центром шара, график  $F$  имеет два симметричных

\* Комбинированным профилированием называется предложенная профессором А. С. Семеновым установка, состоящая из двух «встречных» трехэлектродных установок.

\*\* Таблицы  $F$  даны в книге [280].

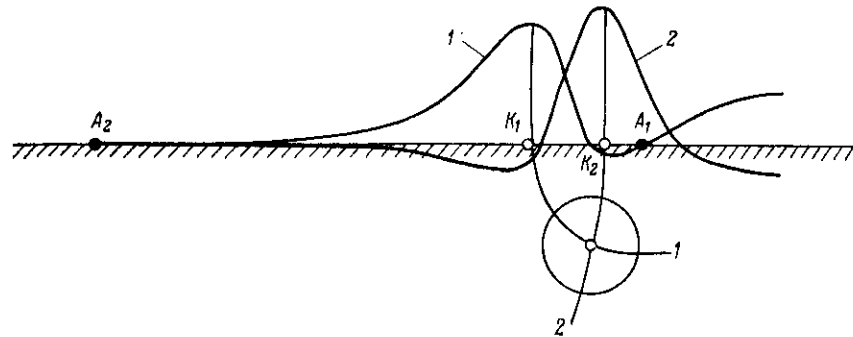
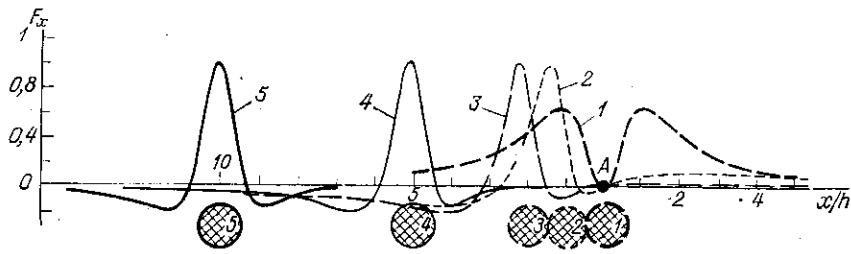


Рис. 50. Графики  $F_z$  при неподвижном точечном источнике тока, расположенном на линии наблюдений.

Рис. 51. Нахождение центра шара по графикам  $F_z$  (при  $\eta_k$ ), полученным при двух положениях источника тока  $A_1, A_2$ .

максимума, равных 0,64. При смещении источника тока от эпицентра шара, например, вправо левый максимум  $F$  становится интенсивнее, а по обе стороны от него появляются минимумы, между тем правый максимум затухает. Но при всех положениях источника тока главный максимум  $F$  расположен от источника тока примерно на том же расстоянии, что и центр шара\*. Эту важную особенность графиков  $F$  (а значит, графиков  $\eta_k$  и  $\rho_k$ ) можно использовать для определения глубины тела, так как при различном положении источника тока пересечение дуг окружностей, проведенных из мест стоянок токового электрода с радиусом  $AK$ , равным расстоянию от электрода  $A$  до максимума аномалии  $K$ , совпадает с центром шара (рис. 51).

Второй максимум  $F$ , расположенный в противоположной стороне от источника тока, с увеличением расстояния  $AC$  между источником тока и эпицентром шара быстро уменьшается и при  $AC > 2h$  становится незначительным. Появление двух максимумов аномальной кажущейся поляризуемости по обе стороны от токового электрода — характерный признак расположения токового элект-

рода над рудным телом. Это надо иметь в виду при интерпретации соответствующих графиков  $\eta_k$ , чтобы не посчитать наличие двух максимумов признаком наличия двух тел.

При относительно близком расположении токовых электродов друг к другу суперпозиция полей выполняется с помощью формулы (106). Различие значений  $F$ , соответствующих влиянию одного и обоих токовых электродов, несущественно при  $AB > 10h$ .

Измерения поля ВП  
с использованием скважин

позволяет приблизить к рудному телу токовый или измерительные электроды и тем самым резко увеличить наблюдаемую аномалию ВП и повысить доступную глубину исследований.

При теоретическом рассмотрении скважинных вариантов метода ВП приходится учитывать разнообразие местоположения и ориентировки измерительной линии  $MN$  по отношению к поляризованному телу и к линии  $AO$ , соединяющей токовый электрод с центром измерительной линии. В примере, показанном на рис. 52, токовый электрод погружен в скважину, а измерительные электроды находятся на поверхности земли. В применении к этому случаю функция  $F$ , входящая в уравнение (215) и характеризующая «геометрические свойства» аномалии ВП, имеет следующий вид:

$$F = \frac{h^3 l^2}{d^2 \cos \psi} \left( \frac{r^2 - 3x^2}{r^5} \sin \varphi + \frac{3hx}{r^5} \cos \varphi \right); \quad (217)$$

$$r = \sqrt{h^2 + x^2},$$

где  $d$  — расстояние от источника тока  $A$  до центра шара  $O^*$ ;  $r$  — расстояние от центра шара  $O^*$  до точки наблюдения  $O$ , находящейся в центре измерительной линии;  $h$  — расстояние  $O^*C$  от центра шара до линии наблюдений, на которой находятся измерительные электроды  $MN$ ;  $\varphi$  — угол между линиями  $O^*A$  и  $O^*C$ ;  $l$  — расстояние от точки наблюдения  $O$  до источника тока  $A$ ;  $\psi$  — угол между линиями  $OA$  и  $OC$ ;  $x = CO$ , причем за положительное взято направление от  $C$  вправо.

В этом виде функция  $F$  представлена как сумма двух слагаемых, первое из которых соответствует составляющей дипольного момента шара, параллельной линии  $CO$ , а второе — составляющей момента, перпендикулярной к  $CO$ .

В условиях наземных работ, описанных выше, электрод  $A$  находится на линии  $CO$  и  $\varphi = 0$ . Тогда как, например, при вертикальных зондированиях увеличение аномалии достигается за счет увеличения  $l$ , сопровождаемого увеличением  $\varphi$ . В пределе, когда  $l \gg h$ ,  $d \approx l$ ,  $\varphi = 90^\circ$  и

$$F = h^3 \left( \frac{r^2 - 3x^2}{r^5} \right) \rightarrow 1. \quad \begin{matrix} x \rightarrow 0 \\ r \rightarrow h \end{matrix}$$

\* Оценка точности совпадения расстояния от источника тока до центра шара и до максимума  $F$  дана автором ранее [129].

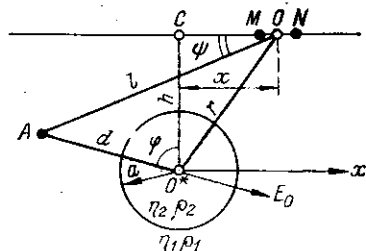


Рис. 52. К выводу формулы для поля ВП тела шаровой формы применительно к скважинным вариантам метода ВП.

Этот случай соответствует полю горизонтального диполя. А при расположении токового электрода над центром шара имеем дело с вертикальным диполем, тогда  $d = h$ ,  $l = x$ ,  $\varphi = 0$  и

$$F = \frac{3h^2x^3}{r^5} \xrightarrow{x \rightarrow h \sqrt{3/2}} 0,6.$$

В условиях скважинных работ увеличение аномальной кажущейся поляризуемости достигается:

- 1) путем приближения к телу источника тока, т. е. за счет уменьшения  $d$ ;
- 2) путем приближения к телу измерительных электродов, т. е. за счет уменьшения  $h$ .

Первый вариант аналогичен схеме «заряда» или погруженного электрода, применяемой в методе сопротивлений. О форме графиков дают представление рис. 53 и 54. На первом из них показаны графики  $F$  для расположения токового электрода на поверхности земли и на глубине, равной половине глубины центра шара. Форма графиков зависит от положения источника тока относительно шара. Но положение максимума  $F$  подчиняется простой закономерности: максимум  $F$  и центр шара равноудалены от точки, лежащей посредине между линией наблюдений (поверхностью земли) и источником тока  $A$ . Максимум  $F$  по мере удаления шара от скважины убывает от 3 до 1, между тем как при расположении токового электрода на поверхности земли возрастает от 0,6 до 1. Отсюда можно сделать вывод о большей эффективности приближения источника тока к телу с помощью скважины по сравнению с увеличением разноса электродов при наземной съемке.

На рис. 54 показаны графики  $\eta_{ан}$  для расположения токового электрода на глубине центра шара на разном расстоянии от шара. Аномальное поле ВП в этой обстановке представляет собой поле горизонтального (параллельного линии наблюдений) диполя, однако  $F$  и аномальная кажущаяся поляризуемость зависят от поведения поляризующего поля в точке наблюдений, а это поле над токовым электродом обращается в нуль. Вследствие этого графики  $\eta_{ан}$  имеют характерную для диполя форму (максимум с двумя небольшими минимумами) только при достаточно большом расстоянии токового электрода от поляризуемого тела. С прибли-

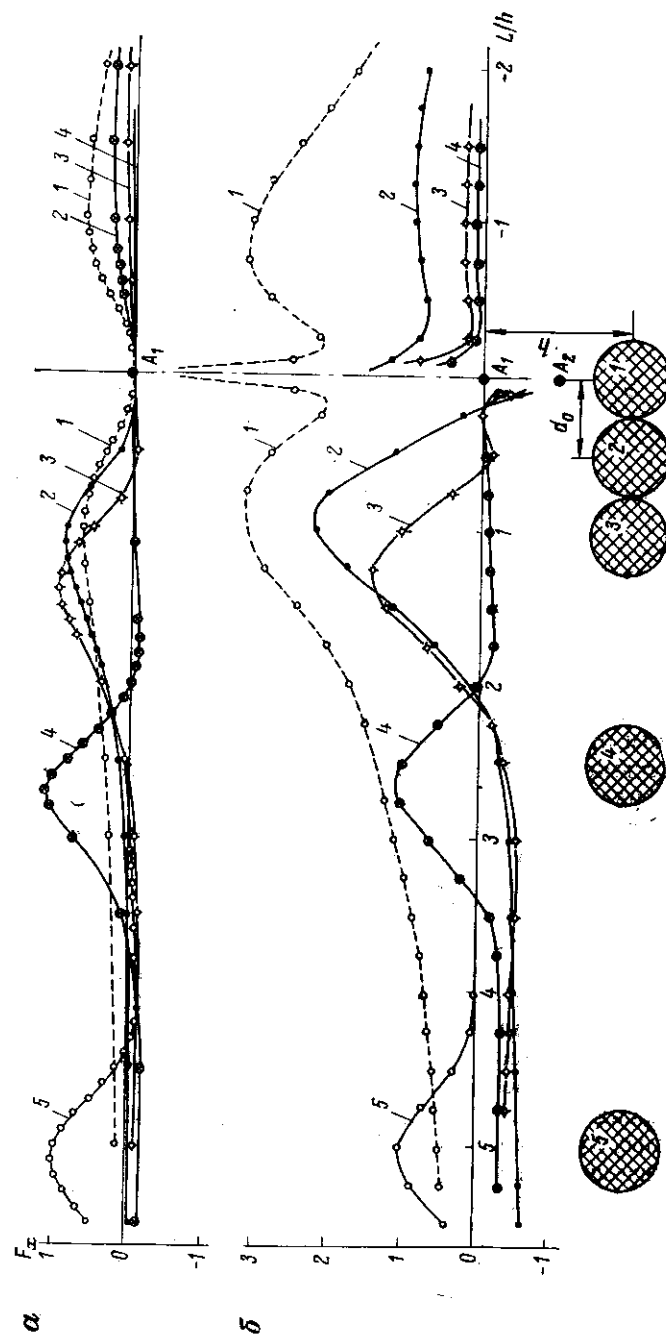


Рис. 53. Графики функции  $F_x$ .

Источник тока  $A$  расположен на линии наблюдений (а) и посредине между линией наблюдений и параллельной ей линией, проходящей через центр шара (б).

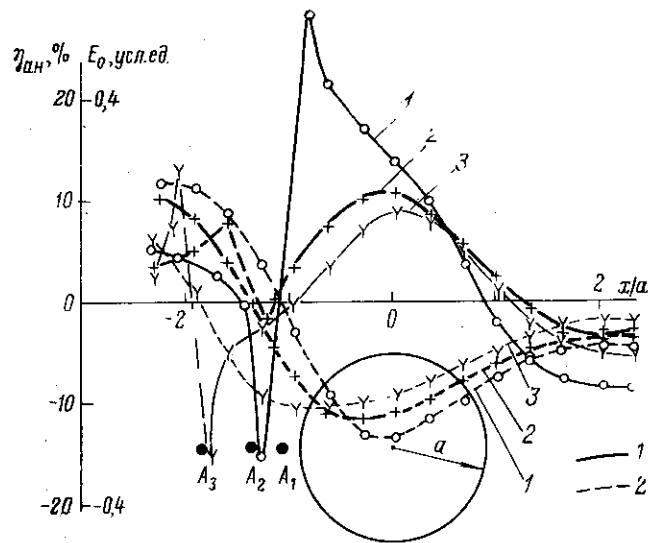


Рис. 54. Графики аномальной кажущейся поляризуемости (1) и напряженности первичного поля (2) по профилю, проходящему над центром шара.

Цифры на графиках соответствуют трем положениям электрода  $A$ .  $\eta_{изб} = 40\%$ .

жением электрода к телу максимум  $\eta_{ан}$  резко возрастает и одновременно смещается от эпицентра тела в сторону токового электрода. В окрестности проекции токового электрода на линию наблюдений  $\eta_{ан}$  имеет весьма высокие положительные и отрицательные значения, а график терпит разрыв.

Сложный вид графиков  $\eta_{к}$  затрудняет их интерпретацию и в ряде случаев вынуждает дополнительно обрабатывать материалы, чтобы вычислить напряженность и потенциал аномального поля ВП [268, 295].

Во втором варианте линий наблюдений, по которой перемещаются измерительные электроды, служит скважина, а токовые электроды остаются на поверхности земли. Этот вариант, аналогичный схеме «вертикального градиента» в методе сопротивлений, в теоретическом отношении сходен с наземной съемкой, за исключением учета границы земля—воздух. В формуле (215) удваивать аномалию не надо, поэтому радиус исследований вокруг скважины в сопоставимых условиях в 1,3 раза меньше, чем глубина исследований при наземной съемке. Но использование скважины в принципе позволяет исследовать любую глубину.

С помощью второго скважинного варианта легко определить глубину залегания поляризованного тела. Для определения направления от скважины на это тело и оценки расстояния между ними применяется так называемая азимутальная съемка, при которой токовый электрод перемещается на некотором расстоянии

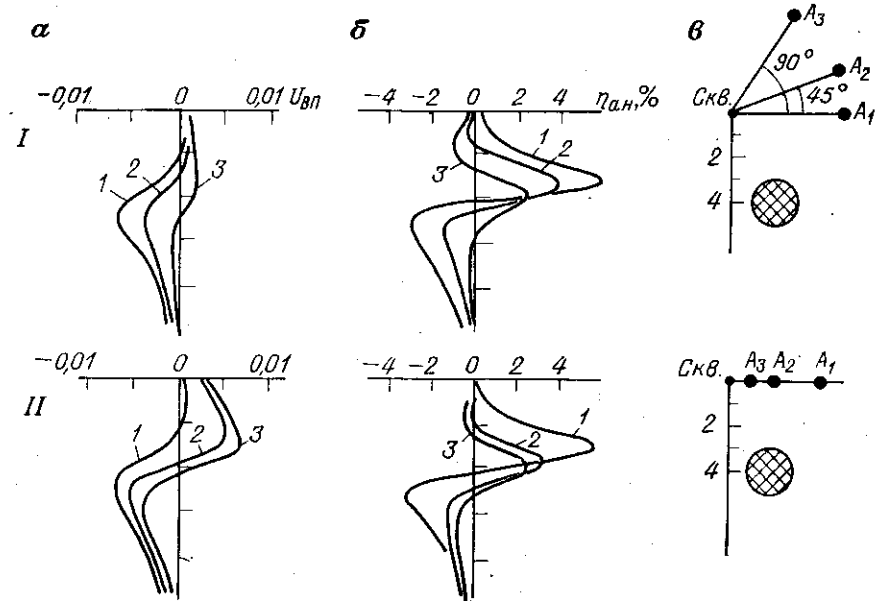


Рис. 55. Теоретические графики аномального потенциала (а) и аномальной кажущейся поляризуемости, соответствующей градиент-установке (б), для шара при измерениях в скважине с различным азимутом расположения источника тока (I) и различным расстоянием его от скважины (II).

Положения источника тока (а) и соответствующие им графики обозначены одинаковыми цифрами.

вокруг устья скважины, в которой находятся измерительные электроды. Измерения в скважине повторяются при каждом положении токового электрода, и по изменениям формы и интенсивности аномалии ВП судят о положении аномального объекта. Графики азимутальной съемки рассчитаны Л. С. Хлопониной [295, 296].

На рис. 55 показаны графики аномального потенциала ВП и кажущейся поляризуемости, соответствующей азимутальной градиент-установке. При расчетах принято  $\sigma_1/\sigma_2 = 1/2$ ;  $\eta_2 - \eta_1 = 40\%$ . Аномальный потенциал ВП имеет положительный знак, когда источник тока находится в стороне, противоположной положению тела относительно исследуемой скважины. Отрицательный знак потенциала наблюдается, когда тело находится между источником тока и скважиной. На графиках  $\eta_{ан}$  для градиент-установки первое положение поляризуемого тела отмечается переходом от отрицательных значений в верхней части скважины к положительным в нижней. Второе положение тела отмечается переходом от положительных к отрицательным значениям  $\eta_{ан}$  при перемещении измерительных электродов по скважине сверху вниз.

**Шар  
в двухслойной среде**

Задача о поле ВП шара, расположенного в нижнем слое двухслойной вмещающей среды, решена В. А. Шафаренко и Т. А. Чистяковой [311.]

Ими рассмотрены случаи, когда точечный источник тока расположен на поверхности земли, на границе слоев и на глубине центра шара. После ряда упрощений получено следующее значение аномальной кажущейся поляризуемости:

$$\eta_{ан} = \eta_{к} - \eta_{ф} = \frac{6a^3\rho_2\rho_{ш}F(\eta_{ш} - \eta_2)}{h^3(2\rho_{ш} + \rho_2)^2 \left(1 + 2\frac{a^3}{h^3}K_{ш}F\right)}, \quad (218)$$

где  $\eta_{к}$ ,  $\eta_2$  — поляризуемость кажущаяся и нижнего слоя;  $\eta_{ш}$  — поляризуемость шара;  $\rho_2$  — удельное сопротивление нижнего слоя;  $\rho_{ш}$  — удельное сопротивление шара;  $a$  — радиус шара;  $h$  — глубина центра шара;  $K_{ш} = (\rho_2 - \rho_{ш})/(\rho_2 + 2\rho_{ш})$ ;  $\eta_{ф}$  — фоновая кажущаяся поляризуемость, соответствующая двухслойной среде в отсутствие шара;  $F$  — геометрическая функция, характеризующая структуру поля ВП шара в двухслойной среде.

Разложение первичного поля на горизонтальную и вертикальную составляющие дает составляющие диполя аналогично формуле (217). Геометрическая функция горизонтального диполя для градиент-установки при источнике тока на поверхности земли равна

$$F_x = h^3(1 - K_{12}) \sum_{n=0}^{\infty} K_{12}^n \frac{(h + 2nH)^2 - 2x^2}{[x^2 + (h + 2nH)^2]^{5/2}}, \quad (219)$$

где  $H$  — мощность верхнего слоя;  $x$  — расстояние от эпицентра шара до точки наблюдения;  $K_{12} = (\rho_2 - \rho_1)/(\rho_2 + \rho_1)$  — коэффициент отражения на границе слоев.

Над центром шара, когда  $x = 0$ , функция  $F_x$  достигает максимума, тогда

$$F_{\max x} = h^3(1 - K_{12}) \sum_{n=0}^{\infty} \frac{K_{12}^n}{(h + 2nH)^3}.$$

Зависимость  $F_{\max x}$  от соотношений удельных сопротивлений слоев, а также глубины шара и мощности верхнего слоя показана в табл. 21.

Геометрическая функция вертикального диполя для той же установки выражается формулой

$$F_z = h^3(1 - K_{12}^2)x^2 \frac{\rho_1}{\rho_{ф}} \sum_{n=0}^{\infty} \sum_{i=1}^{\infty} K_{12}^{n+i} \frac{3x(h + 2nH)}{[x^2 + (h + 2nH)^2]^{5/2} (h + 2iH)^2},$$

где  $\rho_1/\rho_{ф} = E_n/E_{ф}$  — отношение нормального поля точечного источника в однородной среде к его полю в двухслойной среде. Амплитуда максимума  $F_z$  показана в табл. 21.

ТАБЛИЦА 21  
Максимальные значения геометрической функции  $F_x$  для поля ВП шара, находящегося в двухслойной среде (по В. А. Шафаренко и Т. А. Чистяковой [311])

| $\frac{\rho_2}{\rho_1}$ | Горизонтальный диполь |      |      |      | Вертикальный диполь |      |      |      |
|-------------------------|-----------------------|------|------|------|---------------------|------|------|------|
|                         | $H/h$                 |      |      |      | $H/h$               |      |      |      |
|                         | 0                     | 0,1  | 0,2  | 0,5  | 0                   | 0,02 | 0,1  | 0,5  |
| 3                       | 1                     | 0,81 | 0,72 | 0,62 | 0,56                | 0,50 | 0,40 | 0,37 |
| 10                      | 1                     | 0,51 | 0,39 | 0,29 | 0,56                | 0,38 | 0,22 | 0,17 |
| 30                      | 1                     | 0,27 | 0,19 | 0,13 | 0,56                | 0,24 | 0,10 | 0,07 |
| 100                     | 1                     | 0,10 | 0,06 | 0,03 | —                   | —    | —    | —    |

Рост мощности и электропроводности верхнего слоя вызывает, по сравнению с однородной средой, уменьшение амплитуды максимума  $F$  и увеличение его расстояния от источника тока в 1,1—1,2 раза. Последнее означает, что использование способа «засечек» для определения глубины центра шара в двухслойной среде приводит к завышению найденной глубины по сравнению с истинной. Однако это завышение не очень велико, и при решении практических вопросов им можно пренебречь.

На рис. 56 даны графики  $F$  для измерений с градиент-установкой на поверхности земли при источнике тока на поверхности земли, на границе слоев и в нижнем слое. При расчетах принято  $\rho_2/\rho_1 = 10$ ;  $h/H = 3$ .

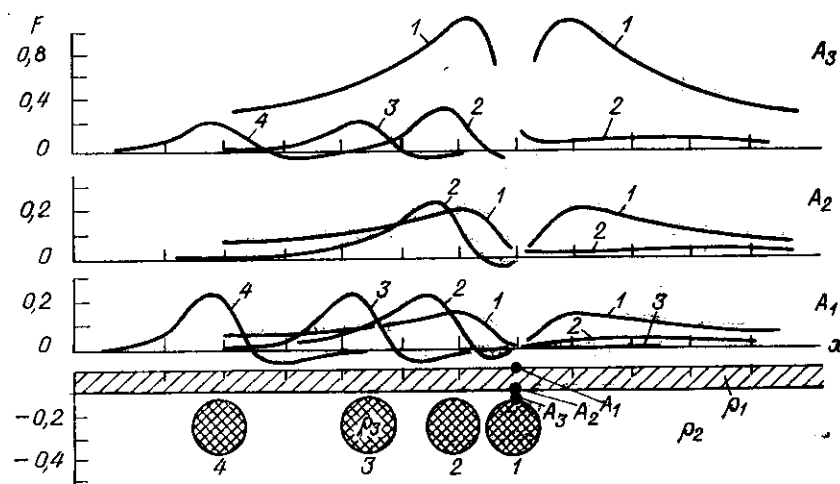


Рис. 56. Графики геометрического коэффициента  $F$  аномалии ВП для градиент-установки при неподвижном точечном источнике тока  $A$ , расположенном на разном расстоянии от сферы, в случаях двухслойной среды.

Цифры на графиках соответствуют нумерации положения сферы. Источник тока  $A_1$  находится на поверхности земли,  $A_2$  — на границе слоев,  $A_3$  — в нижнем слое.

Форма графиков существенно зависит от положения источника тока относительно шара, что связано с изменением соотношения горизонтальной и вертикальной составляющих диполя, отображающего поле ВП шара. Погружение источника тока в нижний слой приводит к росту аномалии ВП, тем более значительному, чем ближе источник тока к шару.

Соотношение  
поверхностной  
и объемной поляризации

Этот вопрос касается возможностей обнаружения методом ВП сплошных и вкрапленных руд, отображаемых свойствами поверхностной и объемной поляризации.

Из формулы (190) следует, что влияние поверхностной поляризации на поляризующее поле вне сферы сводится к увеличению эффективного значения коэффициента  $p_s = \sigma_1/\sigma_2$ , так что он становится равным

$$p_s^* = p_s + n\lambda/a,$$

где  $\lambda$  — коэффициент поверхностной поляризации;  $a$  — радиус электропроводящей сферы;  $n$  — номер члена ряда в разложении аномального поля по полиномам Лежандра; индекс  $S$  указывает на поверхностную поляризацию.

Эффект объемной поляризации, в соответствии с формулой (148\*), для тел любой формы означает, что

$$p_v^* = p_v + p_v(\eta_2 - \eta_1)/(1 - \eta_2),$$

где индекс  $V$  указывает на объемную поляризацию.

Внешний потенциал поля ВП пропорционален приращению  $p$ , равному  $n\lambda/a$  в случае поверхностной поляризации и  $p_v(\eta_2 - \eta_1)/(1 - \eta_2)$  в случае объемной поляризации. Эффекты ВП в обоих случаях примерно равны между собой, если

$$n\lambda/a = p_v(\eta_2 - \eta_1)/(1 - \eta_2). \quad (220)$$

Если  $n = 1$  (сфера в однородном поле);  $p_v = 1$  (электропроводность вкрапленных руд и вмещающей среды одинакова);  $\eta_1 = 2\%$ ;  $\eta_2 = 42\%$ ;  $\lambda = 10$  см, то равенство (220) выполняется при  $a = \lambda(1 - \eta_2)/(\eta_2 - \eta_1) = 14,5$  см.

При большем радиусе сферы эффект объемной поляризации будет больше, чем поверхностной, и наоборот. Роль неоднородности приложенного поля, выражающаяся в появлении мультиполей высокого порядка, в большей мере отражается в эффекте поверхностной поляризации.

Кроме того, надо обратить внимание на различную скорость установления поверхностной и объемной поляризации. Значение  $a$  характеризует радиус электронного проводника. Того же размера тело вкрапленных руд заполнено электропроводящими включениями меньшего радиуса. Соответственно установление поверхностной поляризации происходит медленнее, чем объемной, и правая часть уравнения (220) возрастает быстрее, чем левая. Это

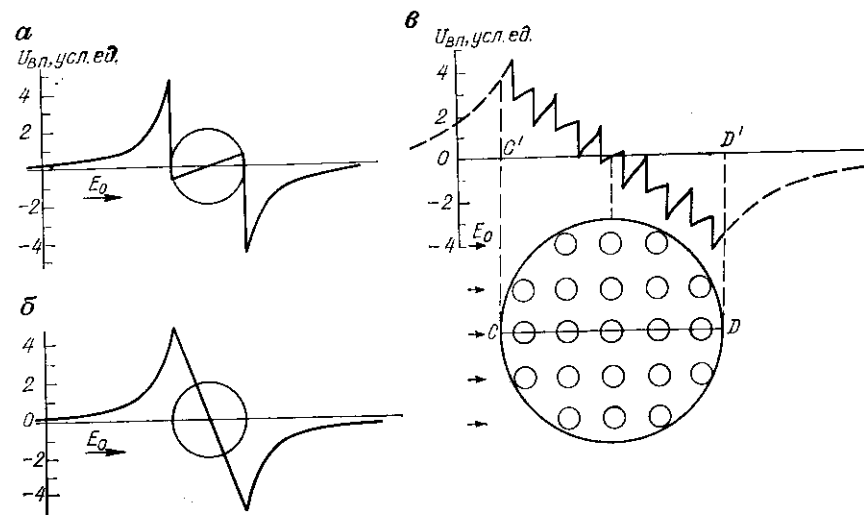


Рис. 57. Поведение потенциала ВП вне и внутри сферы для поверхностной (а) и объемной поляризации (б). Образование объемной поляризации тела из поверхностной поляризации отдельных включений, находящихся в теле (в).

означает, что с течением времени эквивалентный радиус тела возрастает.

Форма графиков внешнего потенциала поля ВП в обоих случаях одна и та же. Внутри тела поведение потенциала ВП различно. При объемной поляризации потенциал ВП на границе тела скачка не имеет и в направлении приложенного поля падает. При поверхностной поляризации имеется скачок потенциала, и внутри тела потенциал ВП несколько возрастает. На рис. 57 показана схема образования объемной поляризации в результате суммирования потенциалов поверхностной поляризации электропроводящих включений.

Интенсивность аномальных полей ВП зависит от типа поляризации. При поверхностной поляризации поле ВП пропорционально квадрату радиуса тела и коэффициенту  $\lambda$ ; при объемной поляризации — кубу радиуса и избыточной поляризуемости. Это различие необходимо иметь в виду для соблюдения подобия условий лабораторных и полевых работ.

В полевых условиях, когда ведутся поиски тел с радиусом в десятки метров и более, ВП вкрапленных руд больше, чем ВП сплошных руд тех же размеров и того же пространственного положения. Напротив, небольшие по размерам и соответственно неглубоко залегающие металлические предметы или сульфидные тела могут создать, по сравнению с такими же телами вкрапленных руд, более интенсивные аномалии.

Еще больше эффект ВП, создаваемый моделями, изготовленными из сплошных кусков металла или из электропроводящих

руд, по сравнению с моделями, изготовленными из порошка того же металла или руды. Некоторые исследователи, обнаружив в лабораторных условиях преобладание аномалий, создаваемых сплошными рудами, ошибочно полагали, что и в полевых условиях роль вкрапленности будет относительно небольшой.

Роль ореола  
рудной вкрапленности,  
окружающей  
сплошные руды

Для оценки роли вкрапленности рассмотрена задача о помещенной в однородное поле идеально проводящей неполяризующейся сфере, окруженной концентрической оболочкой вкрапленности [124]. Конечная формула имеет вид

$$\theta = \eta_{ан}(x)/\eta_{ан}(0) = [1 + x^3(1 - 2x^2)]/(1 - x^3\psi), \quad (221)$$

$$\text{где } \psi = \frac{2\eta^* + (3 - 2\eta^*) A^3/h^3}{3 - \eta^* + \eta^* A^3/h^3};$$

$\theta$  — отношение аномальных значений кажущейся поляризуемости при произвольном значении  $x = a/A$  и при  $\bar{x} = 0$ ;  $\eta^*$  — избыточная поляризуемость зоны вкрапленников ( $\eta^* = \eta_2 - \eta_1$ ) (рис. 58).

Зависимость  $\theta$  от  $x$  показана на рис. 58 для трех значений  $\psi$ , соответствующих точкам наблюдения у поверхности зоны вкрапленников ( $x = 1$ ,  $\psi = 1$ ), на расстоянии  $h = 1,25A$  и  $h = 5,5A$ . В двух последних случаях было принято, что  $\eta^* = 20\%$ , тогда значения  $\psi$  составляли 0,7 и 0,15. Заштрихованная область между этими двумя графиками дает значения  $\theta$ , наиболее вероятные в практических условиях. Из приведенных данных следует, что вкрапленность, окружающая идеально проводящее неполяризующееся ядро, создает аномалию ВП несколько большую, чем только вкрапленность в том же объеме тела. И лишь при очень малых

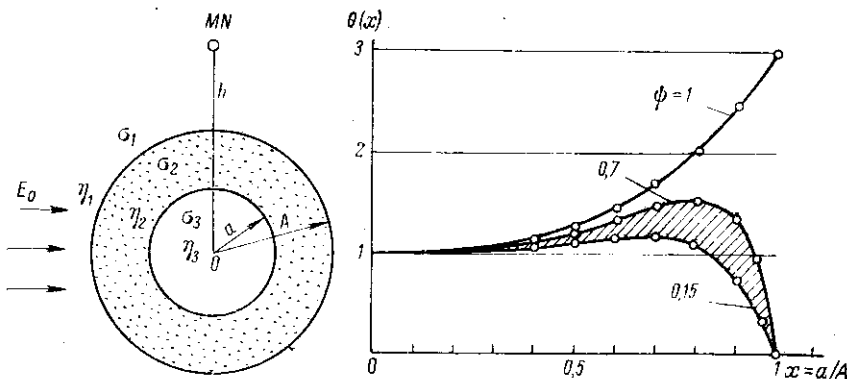


Рис. 58. Графики функции  $\theta(x)$ , характеризующей зависимость аномалии ВП от протяженности ореола вкрапленности вокруг изометрического тела сплошных руд.

$$\sigma_1 = \sigma_2; \sigma_3 \gg \sigma_1; \eta_1 > \eta_2; \eta_3 = 0.$$

размерах ореола вкрапленности, когда  $x > 0,9$ , аномалия резко уменьшается.

Здесь дана оценка только эффекта объемной поляризации зоны вкрапленников. Между тем сплошные руды, обладающие электронной проводимостью, подвергаются поверхностной поляризации, которая также участвует в создании аномалий ВП, особенно при небольшой глубине залегания руд и длительной зарядке.

Решение задачи для более сложного случая поля точечного источника тока и произвольных соотношений электропроводности шара, вмещающей среды и зоны вкрапленников получил Б. И. Геннадик [60]. Он пришел к следующим выводам:

1) поверхностная поляризация тел может заметно проявляться лишь при высокой электропроводности ядра;

2) при мощности зоны вкрапленников, превышающей радиус внутреннего ядра сплошных руд, аномалии  $\eta_k$  и  $\rho_k$  почти полностью определяются параметрами зоны вкрапленников;

3) наиболее интенсивные аномалии  $\eta_k$  наблюдаются над хорошо проводящим рудным телом, окруженным вкрапленностью, электропроводность которой та же, что у вмещающей среды (этот случай разобран нами выше);

4) значительные аномалии  $\eta_k$  могут встречаться над плохо проводящими телами, окруженными вкрапленностью, имеющей электропроводность на порядок выше, чем вмещающие породы.

В целом, с теоретической точки зрения, тела сплошных руд, окруженные ореолом рудной вкрапленности, не менее удобный объект поисков для метода ВП, чем существенно вкрапленные руды.

## ВЫВОДЫ

1. Применение обоснованного способа вычислений дает теоретические формулы и численные значения поля ВП электропроводящей сферы, согласующиеся с результатами лабораторных измерений ВП над металлической моделью. Тем самым подтверждается правильность исходных уравнений.

2. Установлены взаимоотношения разных способов вычислений аномальных полей ВП, а также их формальная связь с известными способами вычисления аномалий  $\rho_k$ . Благодаря этому удалось путем несложных вычислений получить сведения об аномалиях кажущейся поляризуемости, соответствующих профилированию над шаром с потенциал- и градиент-установками. Выяснены зависимости аномалий ВП от разносов электродов и схем измерений; показано преимущество градиент-установки для решения поисково-геологических задач.

3. Применительно к измерениям градиента потенциала поля ВП с неподвижными токовыми электродами установлено, что максимум аномалии кажущейся поляризуемости и центр шарообразного тела находятся примерно на равном расстоянии от источника поляризующего тока. Эта черта аномалий ВП дает простой способ оценки глубины центра поляризуемого тела.

4. Использование скважин и других горных выработок для погружения в них токовых и измерительных электродов приводит, как показали расчеты, к значительному увеличению наблюдаемых аномалий ВП. Это служит основанием для широкого применения скважинных вариантов метода ВП при поисках и разведке глубоко залегающих рудных тел в условиях, когда наземная съемка неэффективна.

5. Сопоставление полей ВП, создаваемых электропроводящим телом и занимающим тот же объем телом вкрапленников, показало, что первый эффект

ВП преобладает для тел относительно небольших размеров (примерно до 10–20 см), но при большом размере тел уступает эффекту ВП, порождаемому вкрапленностью. Учет этого строго необходим для переноса результатов лабораторных работ с небольшими моделями на условия полевых работ.

6. Тела сплошных хорошо проводящих руд, окруженных ореолом рудной вкрапленности, создают аномалии ВП, как правило, выше, чем такого же размера тела вкрапленных руд. Присутствие сплошных руд не ухудшает возможности метода ВП.

7. Поляризуемость вкрапленных руд практически определяется лишь концентрацией электропроводящих включений в том или ином объеме пород и отчасти геометрической формой и размером включений, но мало зависит от минерального состава включений. Различие анодной и катодной поляризации электропроводящих минералов приводит к эффекту «выпрямления тока». Соответствующий параметр НВП определяется минеральным составом и размером электропроводящих тел. Использование нелинейных эффектов открывает перспективу повышения разрешающей способности метода ВП.

### ВП ТЕЛ СФЕРОИДАЛЬНОЙ ФОРМЫ

Расчеты аномального поля ВП, создаваемого сплюснутыми объемно поляризованными сфероидом, были выполнены Л. С. Хлопониной для однородного внешнего поля и поля точечного источника тока. При этом были использованы общие положения теории поля [277] и изложенные выше способы вычислений полей ВП. Исследования поверхностно поляризованного сфероидом выполнены А. А. Гельбухом [58], Р. Розлером [396] и Б. И. Геннадиевичем [59, 60]. Ниже изложен единый подход к решению задач о поверхностной и объемной поляризации сфероидом.

Сфероид  
в однородном поле,  
параллельном его осям

При однородном поле, параллельном одной из осей сфероидом, аномальный электрический потенциал первичного поля, обуслов-

ленный различием электропроводности сфероидом и вмещающей среды, может быть представлен в виде

$$U_{ан} = N M_n F(x, z), \quad (222)$$

где  $M_n$  — аномальный момент проводимости сфероидом;  $F$  — безразмерная функция координат точки наблюдения;  $N$  — числовой масштабный множитель.

Известные выражения момента сфероидом [277, 294] можно выразить через введенную ранее функцию  $G$ , тогда

$$M_n = \frac{(1-p)(G+1)}{4\pi(p+G)} V E_0, \quad (223)$$

где  $V = \frac{4}{3} \pi abc$  — объем сфероидом;  $a, b, c$  — полуоси сфероидом;  $E_0$  — напряженность приложенного поля.

Выражение  $G$  через коэффициенты размагничивания дано в формулах (139)–(143); числовые значения  $G$  приведены в табл. 20. Значения  $N, M_n$  и  $F$  зависят от формы сфероидом и его ориентировки относительно приложенного поля.

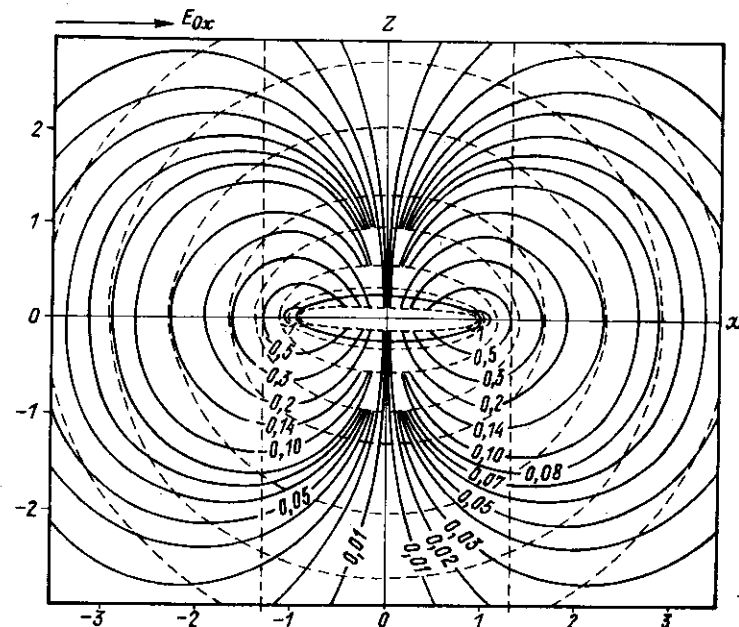


Рис. 59. Карта линий равных значений аномального потенциала, создаваемого софокусными сфероидом в однородном поле, параллельном фокальной плоскости сфероидом. Плоскость главного сечения.

Для внешнего поля сжатого сфероидом Л. С. Хлопонина вычислила и построила приведенные на рис. 59 и 60 карты линий равных значений функции  $F(x, z)$ , соответствующие плоскости главного сечения сфероидом. В качестве координат взяты эксцентриситет сфероидом, софокусных заданному, и одна из декартовых координат  $x$  или  $z$ , совпадающая с направлением приложенного поля  $E_0$ .

Если поле  $E_0$  направлено перпендикулярно к оси вращения сжатого сфероидом (вдоль его большой полуоси), то для точек вне сфероидом

$$F_x = x(\arcsin e - e\sqrt{1-e^2}), \quad (224)$$

где  $e$  — эксцентриситет координатного сфероидом;  $x$  — безразмерная координата, равная отношению расстояния точки наблюдения от плоскости  $yz$ , проходящей через центр сфероидом, к полуфокусному расстоянию заданного сфероидом, равному  $\sqrt{a^2 - c^2}$  ( $a$  — большая полуось сфероидом, соответствующая его круговому сечению;  $c$  — малая полуось, лежащая на оси вращения).

Формуле (224) соответствует следующее выражение масштабного коэффициента для бесконечного пространства:

$$N_x = 3/[2(a^2 - c^2)]. \quad (225)$$

Для наблюдений на границе полупространства значение  $N_z$  надо удвоить. Если поле  $E_0$  направлено вдоль оси вращения сжатого

сфероид (вдоль малой полуоси  $c$ ), то для точек вне сфероид

$$F_z = z \left( \frac{e}{\sqrt{1-e^2}} - \arcsin e \right) \quad (226)$$

и масштабный коэффициент для бесконечного пространства

$$N_z = 3/(a^2 - c^2). \quad (227)$$

Оцифровка сплошных линий на рис. 59 и 60 дает значения  $F_x$  и  $F_z$ . Штриховыми линиями показаны софокусные сфероиды, из которых в масштабе рисунка надо выбрать заданный по значению эксцентриситета. Значения  $F_z$  и  $F_x$  слева от плоскости, проходящей через центр сфероид перпендикулярно к полю  $E_0$ , отрицательные, справа от этой плоскости — положительные.

Для точек наблюдения, выходящих за пределы рис. 59 и 60, функцию  $F(x, z)$  можно выразить как поле диполя, ось которого параллельна приложенному полю:

$$F_x = x(a^2 - c^2)/r^3; \quad (228)$$

$$F_z = (a^2 - c^2)\sqrt{r^2 - x^2}/r^3, \quad (229)$$

где  $x$  — расстояние точки наблюдения от проекции центра сфероид на линию наблюдений, считаемую параллельной  $Ox$ ;  $r$  —

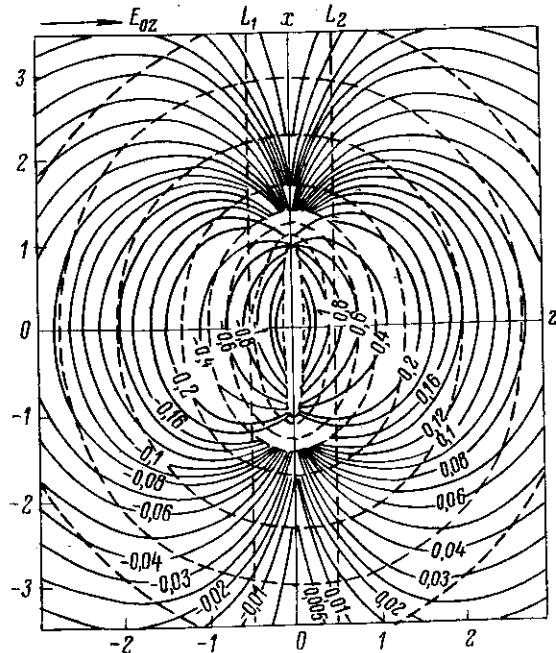


Рис. 60. Карта линий равных значений аномального потенциала, создаваемого софокусными сфероидами в однородном поле, параллельном оси вращения сфероид. Плоскость главного сечения.

расстояние от центра сфероид до той же точки наблюдения.

Для удлинённых сфероидов функцию  $F(x, z)$  можно вычислить по приближенной формуле:

$$F(x, z) = (1/f) (1/r_2 - 1/r_1), \quad (230)$$

где  $f$  — расстояние между фокусами сфероид, равное  $2\sqrt{c^2 - a^2}$ ;  $r_1$  и  $r_2$  — расстояние до точки наблюдения от одного и другого фокусов.

Множитель  $N = 1$  для бесконечного пространства и  $N = 2$  для наблюдений на границе земля—воздух. Знак  $M_{\text{вп}}$  положительный для хорошо проводящего сфероид ( $p < 1$ ) и знак  $U_{\text{ан}}$  тот же, что  $F$ , т. е. отрицательный слева от центра сфероид и положительный справа от него. Для плохо проводящего сфероид ( $p > 1$ )  $M_{\text{вп}} < 0$  и знак  $U_{\text{ан}}$  противоположен знаку  $F$ . Электрическая аномалия тем больше, чем больше вытянутость сфероид вдоль приложенного поля для хорошо проводящего сфероид и тем меньше она для плохо проводящего.

Потенциал поля ВП сфероид имеет ту же структуру, что и рассмотренный аномальный электрический потенциал:

$$U_{\text{вп}} = NM_{\text{вп}}F(x, z), \quad (231)$$

где  $N$  и  $F$  сохраняют вышеприведенные значения;  $M_{\text{вп}}$  — момент ВП сфероид. Опуская математические выкладки, приведем окончательный результат:

$$M_{\text{вп}} = - \frac{\Delta p (G + 1)^2 VE_0}{4\pi (p + G) (p + G + \Delta p)}, \quad (232)$$

где  $\Delta p$  — приращение  $p$  за счет ВП.

При поверхностной поляризации

$$\Delta p = \lambda/l, \quad (233)$$

где  $\lambda$  — коэффициент поверхностной поляризации;  $l$  — та полуось сфероид, вдоль которой направлено приложенное поле  $E_0$ .

В случае объемной поляризации

$$\Delta p = p(\eta_2 - \eta_1)/(1 - \eta_2). \quad (234)$$

Момент ВП сфероид, отличающегося от вмещающей среды высокой поляризуемостью, так же как поверхностно поляризованного сфероид, имеет отрицательный знак. Соответственно потенциал ВП имеет знак, противоположный знаку функции  $F(x, z)$ , приведенной на рис. 59 и 60, но конфигурация аномального поля остается для всех сфероидов одинаковой.

Аномальную кажущуюся поляризуемость, наблюдаемую вне сфероид, можно вычислить по формуле

$$\eta_{\text{ан}} = \Delta U_{\text{вп}}/(\Delta U_0 + \Delta U_{\text{ан}}), \quad (235)$$

где  $\Delta U_0$  — разность потенциалов первичного нормального поля;  $\Delta U_{\text{ан}}$ ,  $\Delta U_{\text{вп}}$  — разность потенциалов первичного аномального поля и поля ВП, созданного сфероидальным телом.

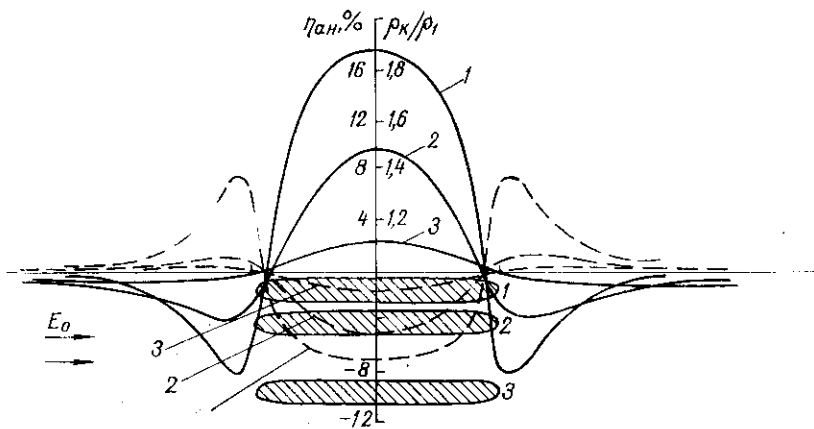


Рис. 61. Графики  $\eta_{ан}$  (сплошные линии) и  $\rho_k/\rho_1$  (штриховые линии) над горизонтальными сфероидом при различном расстоянии от них до линии наблюдений.

$a = 10c$ ;  $z$ : 1 — 1,5  $c$ ; 2 — 4  $c$ ; 3 — 10  $c$ .

Потенциал первичного нормального поля вычисляют по известной формуле:

$$U_0 = IN/(4\pi\sigma_1 L), \quad (236)$$

где  $\sigma_1$  — электропроводность вмещающей среды;  $L$  — расстояние от источника тока до измерительного электрода; для бесконечного пространства  $N = 1$ ; для наблюдений на поверхности земли  $N = 2$ ;  $I$  — сила тока.

Потенциалы аномальных полей для сжатых сфероидов можно найти по формулам (222)—(234) с помощью карт изолиний функции  $F$ . При этом поле  $E_0$  имеет значение и направление, соответствующие нормальному полю в центре сфероидов. В случае косо ориентировки возбуждающего поля относительно осей сфероидов необходимо поле  $E_0$  разложить на составляющие вдоль и поперек оси вращения и найти сумму аномальных потенциалов первичного поля и поля ВП.

Для нахождения разностей потенциалов указанных трех полей надо построить линию наблюдений относительно сфероидов с заданным эксцентриситетом и для каждого местоположения измерительных электродов вычислить сначала потенциалы  $U_0$ ,  $U_{ан}$  и  $U_{ВП}$ , а затем их разности, входящие в формулу (235).

Характер аномалий  $\eta_k$  и  $\rho_k$  при наблюдениях вдоль большой оси сжатого сфероидов показан на рис. 61. Следует отметить, что ширина аномалии ВП примерно равна горизонтальному размеру сфероидов. Для удлиненных сфероидов функцию  $F(x, z)$  вычисляют по формуле (230), при этом возбуждающее поле тоже разлагают на составляющие вдоль оси сфероидов и поперек нее.

Момент ВП поверхностно поляризованного сфероидов затухает по мере роста  $\rho$ , т. е. при уменьшении его относительной электропроводности. Для объемной поляризации существует максимум  $M_{ВП}$ , соответствующий

$$\rho_{max} = G \sqrt{\frac{1-\eta_1}{1-\eta_2}} \approx G. \quad (237)$$

Из данных о значениях  $G$  в табл. 19 видно, что максимум  $M_{ВП}$  для сфероидов, ориентированных большой осью вдоль приложенного поля, должен смещаться в сторону высокой электропроводности сфероидов. Для стержневидного сфероидов ( $c \gg a$ ), в соответствии с формулой (140),

$$\rho_{max} = G_z = (a^2/c^2) (\ln(2c/a) - 1). \quad (238)$$

Для дискообразного сфероидов ( $a \gg c$ ), в соответствии с формулой (143),

$$\rho_{max} = G_x = (\pi/4)(c/a). \quad (239)$$

Для сфероидов, ориентированных поперек приложенного поля, максимум  $M_{ВП}$  смещается в сторону низкой электропроводности сфероидов. Для стержневидного сфероидов, в соответствии с формулой (141),

$$\rho_{max} = G_x = 1. \quad (240)$$

Для дискообразного сфероидов, в соответствии с формулой (142)

$$\rho_{max} = G_z = (2/\pi)(a/c). \quad (241)$$

Переходная характеристика ВП сфероидов описывается формулами (126) и (138)—(143). Коэффициенты  $\rho$  и  $G$  отражают свойства отдельного поверхностно поляризованного электропроводящего сфероидов или многочисленных сфероидальных включений, создающих объемную поляризацию того или иного тела. Внутри сфероидов

$$U_{ан} = (\rho - 1) \frac{E_0}{1 + \rho/G} \quad (242)$$

и потенциал ВП для объемной поляризации

$$U_{ВП} = \frac{\eta_2 - \eta_1}{1 - \eta_2} \cdot \frac{\rho G (G + 1)}{(\rho + G)^2} E_0. \quad (243)$$

Аномальный потенциал поверхностной поляризации внутри тела мал, а его градиент намного уступает эффекту объемной поляризации. Применительно к измерениям градиентов потенциалов вдоль той или иной оси внутри сфероидов

$$\phi = \frac{\eta_k - \eta_1}{\eta_2 - \eta_1} = \frac{\rho_k - \rho_1}{\rho_2 - \rho_1} = \frac{1}{1 + \rho/G}, \quad (244)$$

где  $\rho_k$  — кажущееся удельное сопротивление внутри сфероидов;  $\rho_2$ ,  $\rho_1$  — удельное сопротивление сфероидов и вмещающей среды.

В общем случае аномальные потенциалы находят как сумму двух слагаемых, соответствующих составляющим возбуждающего нормального поля  $E_{0z} = E_0 \cos \psi$  и  $E_{0x} = E_0 \sin \psi$ , где  $\psi$  — угол между направлением поля  $E_0$  и осью вращения сфероид.

Вне сфероида аномальный потенциал первичного поля

$$U_{ан} = N_x M_{пх} F_x + N_z M_{пз} F_z, \quad (245)$$

где индексы  $x$  и  $z$  соответствуют составляющим возбуждающего поля.

Нахождение каждой составляющей показано выше. Составленные Л. С. Хлопониной таблицы значений  $M_{пх}^*$  и  $M_{пз}$  для сжатых сфероидов опубликованы [280].

Аналогично вычисляется потенциал поля ВП сфероид. Вне сфероида

$$U_{ВП} = N_x M_{ВПx} F_x + N_z M_{ВПz} F_z, \quad (246)$$

внутри его

$$U_{ВП} = \frac{\eta_2 - \eta_1}{1 - \eta_2} p \left[ \frac{G_x (G_x + 1)}{(G_x + p)^2} E_{0x} x + \frac{G_z (G_z + 1)}{(G_z + p)^2} E_{0z} z \right], \quad (247)$$

где отсчет  $z$  ведется от центра сфероиды вдоль оси вращения в направлении поля  $E_{0z}$ ; отсчет  $x$  — поперек оси вращения;  $G_x$  и  $G_z$  — коэффициент для продольного и поперечного полей.

Все величины определены выше. Определив аномальные потенциалы в точках заданной линии наблюдений, нетрудно по формуле (235) вычислить аномальную кажущуюся поляризуемость как снаружи, так и внутри тела.

Для прямого определения напряженностей аномальных полей Л. С. Хлопонина построила специальные карты, аналогичные тем, что показаны на рис. 59 и 60, причем в общем случае, когда приложенное поле не параллельно осям сфероиды и не параллельно линии наблюдений, вдоль которой располагаются измерительные электроды, приходится использовать четыре карты [280].

На рис. 62 приведены графики аномальной кажущейся поляризуемости для градиент-установки в условиях однородного внешнего возбуждающего поля, направленного под углом  $45^\circ$  к оси сжатого сфероиды. Линии наблюдений, имитирующие вертикальные скважины, ориентированы вдоль возбуждающего поля. Одна из линий касается сфероиды в верхней части, вторая проходит через центр сфероиды, третья пересекает его в нижней части. График  $\eta_{ан}$  по второй линии симметричен относительно максимума, расположенного в центре сфероиды, графики по двум другим линиям асимметричны. Более пологая ветвь  $\eta_{ан}$  наблюдается в той

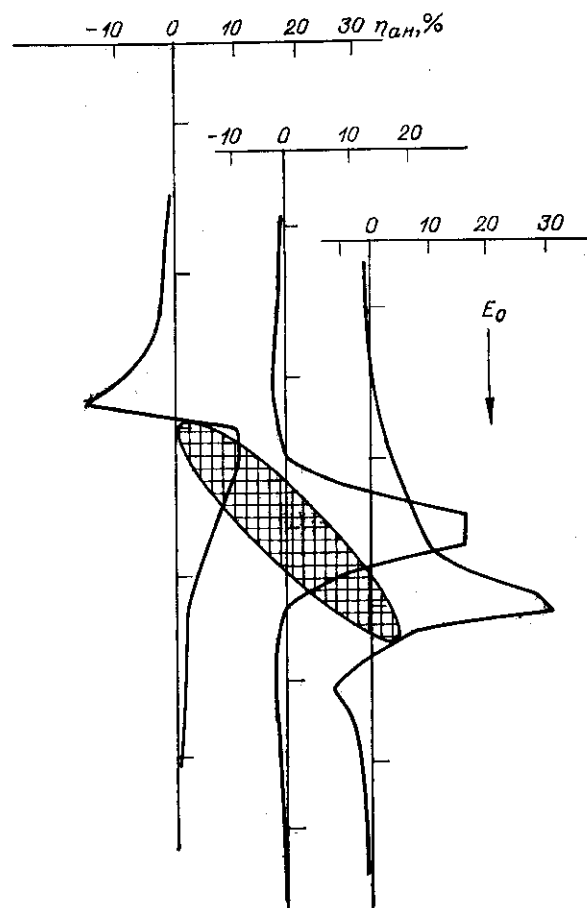


Рис. 62. Графики  $\eta_{ан}$  при различном положении линии наблюдения относительно сплюснутого сфероиды (по Л. С. Хлопониной).

части линии наблюдений, на которую проецируется поляризуемое тело. Вне проекции тела рядом с ее границами происходят резкие спады  $\eta_{ан}$  — вплоть до отрицательных значений.

Сфероид  
в поле точечного  
источника тока

В математическом отношении эта задача довольно сложная. Сначала находят аномальный электрический потенциал для конкретных условий формы сфероиды, его положения относительно источника тока и линии наблюдений и его электропроводности. При этом используют разложение потенциала в ряды по присоединенным полиномам Лежандра. Затем графическим способом определяют градиент потенциала [280, 296].

Для вычислений аномального потенциала ВП и его градиента используют пары значений аномального электрического потенциала или градиента, соответствующие двум заданным значениям электропроводности сфероидов, т. е.  $p$  и  $p^* = p(1 - \eta_1)/(1 - \eta_2)$ , при прочих равных условиях. Таким путем Л. С. Хлопонина вычислила несколько десятков графиков для наиболее интересных случаев, относящихся к условиям как наземных работ, так и различных скважинных вариантов метода ВП [52, 268, 280, 296]. Рассмотрим несколько примеров.

На рис. 63 показаны результаты расчетов  $\eta_k$  и  $\rho_k/\rho_1$  для градиент-установки при расположении источника тока в центре сфероидов и наблюдениях вдоль его оси вращения и поперек нее, а также

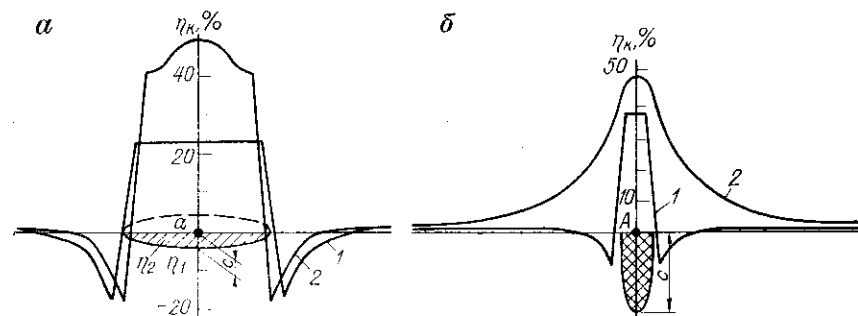
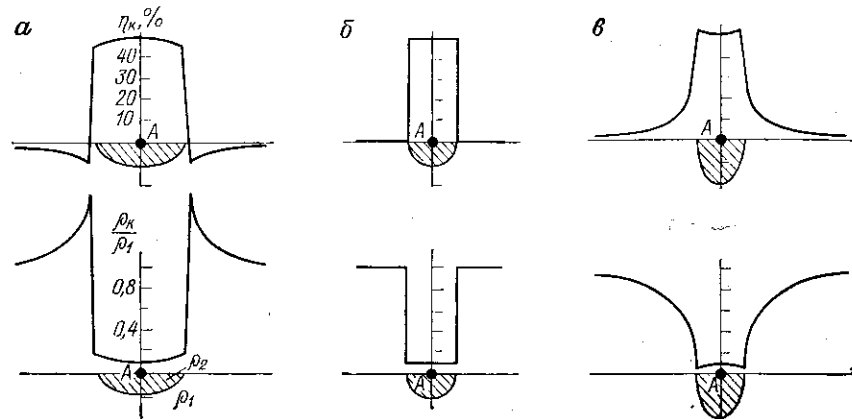


Рис. 63. Графики  $\eta_k$  и  $\rho_k/\rho_1$  при расположении точечного источника тока в центре сплюснутого сфероидов.

$a$  — горизонтальный сфероид ( $a = 2c$ );  $б$  — шар ( $a = c$ );  $в$  — вертикальный сфероид ( $a = 2c$ ).

Рис. 64. Графики  $\eta_k$  по линиям наблюдений, проходящим через центр сферических тел.

$\eta_1 = 2\%$ ;  $\eta_2 = 50\%$ ,  $a = 5c$ .  
Сфероид:  $a$  — горизонтальный,  $б$  — вертикальный.

1 — тело находится в однородном поле посредине между токовыми электродами; 2 — источник тока в центре сфероидов.

для шара. Вблизи источника тока  $\eta_k$  и  $\rho_k$  равны истинным значениям поляризуемости  $\eta_2$  и удельного сопротивления  $\rho_2$  сфероидов. С приближением к поверхности тела  $\eta_k$  и  $\rho_k$  зависят от формы тела и направления приложенного поля. В случае шара  $\eta_k$  и  $\rho_k$  скачкообразно меняются на границе тела, принимая вне шара значения поляризуемости и удельного сопротивления вмещающей среды  $\eta_1$  и  $\rho_1$ . Для горизонтального сфероидов у его контакта с вмещающей средой наблюдаются минимумы  $\eta_{ан}$ , а в случае вертикального сфероидов — относительно постепенный спад  $\eta_{ан}$  до нуля. Графики  $\rho_k$  над хорошо проводящим сфероидом являются как бы зеркальным отражением графиков  $\eta_k$  (над плохо проводящими сфероидом форма графиков  $\eta_k$  и  $\rho_k$  весьма сходна).

Еще один пример дан на рис. 64, где сопоставлены графики  $\eta_k$  и  $\rho_k$ . Линия наблюдений по-прежнему проходит по оси вращения сфероидов. Над горизонтальным сплюснутым сфероидом в обоих случаях максимум сопровождается четко выраженными минимумами  $\eta_{ан}$ . Над вертикальным сфероидом форма графиков 1 и 2 различная: минимумы  $\eta_{ан}$  наблюдаются лишь при измерениях «срединных градиентов». Если источник тока находится внутри тела, то происходит постепенный спад положительных значений  $\eta_{ан}$ . Выполнив двукратные измерения с расположением источника тока внутри тела и вне его, можно оценить форму тела и его протяженность в глубину, поскольку все величины, кроме протяженности тела, входящие в формулу (244), измеряются непосредственно.

В предыдущих примерах линия наблюдения проходила внутри тела, так что условия в наибольшей мере отвечали изучению тела, выходящего на поверхность земли или пересеченного скважиной, в которой осуществляются измерения. О графиках  $\eta_{ан}$  для источника тока, помещенного вне тела, можно судить по рис. 65. Графики похожи на предыдущие, но сглаженные, без скачков  $\eta_k$ , характерных для пересечения контактов тел с разной поляризуемостью. Наибольшая аномалия для хорошо проводящего сфероидов наблюдается, когда источник тока находится на продолжении большой оси тела, при этом одиночный максимум  $\eta_k$  смещен от проекции «головы» тела в сторону его падения. Если источник тока расположен над телом, то имеются два максимума, причем более интенсивный находится за «головой» тела в направлении его восстания, а менее интенсивный, но более широкий максимум находится со стороны падения тела.

Различие в максимумах  $\eta_k$  особенно велико, когда тело имеет относительно высокую электропроводность и большую вытянутость.

Реальные рудные тела обычно неоднородны. Нередко вокруг центральной части, сложенной сплошными и прожилковыми рудами, обладающими высокой электропроводностью, залегают вкрапленные руды, протяженность ореола которых подчас бывает значительной. Подобные тела можно аппроксимировать совокупностью софоксических сфероидов, имеющих разные электропровод-

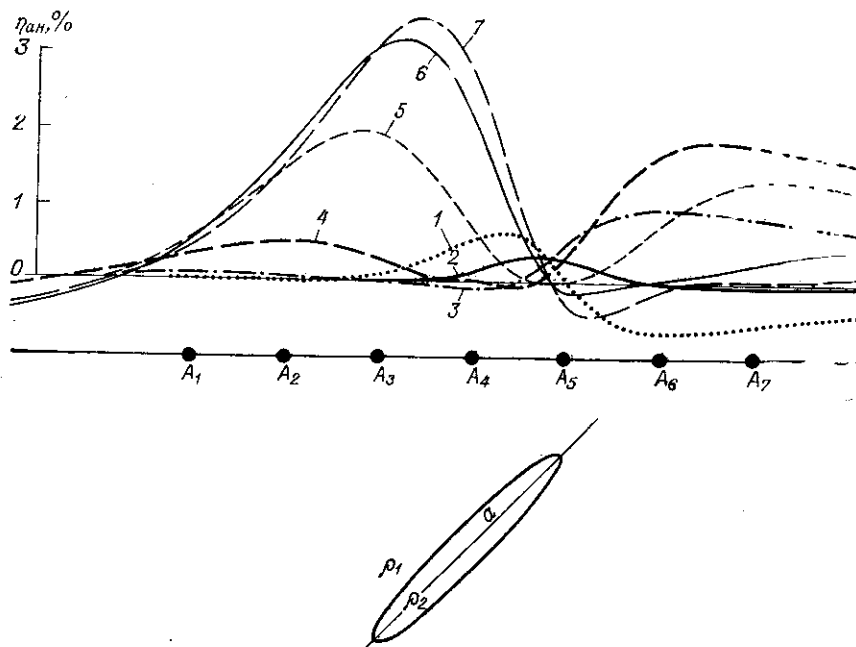


Рис. 65. Графики  $\eta_{ан}$  над сплюснутым сфероидом при различном положении точечного источника тока относительно сфероид (по Ю. М. Гуревичу).  $\rho_2/\rho_1 = 0,1$ ;  $a = 7c$ ;  $\eta_{вс} = 40\%$ .

ность и поляризуемость. Теоретическую сторону этой задачи рассмотрел Б. И. Геннадик [60]. Он пришел к выводу, аналогичному тому, что сделан выше на примере шарообразных тел: при наличии ореола вкрапленности аномалия ВП относительно выше, если внутренняя часть тела имеет высокую электропроводность.

### ВЫВОДЫ

1. Интенсивность и форма аномалии ВП зависят от формы тела, его электропроводности и ориентировки приложенного поля относительно «большой» оси тела. Наибольшие аномалии соответствуют полю, направленному вдоль большой оси хорошо проводящего сфероид и перпендикулярно к ней — для плохо проводящего сфероид. При этом наиболее выгодной всегда является линия, проходящая вдоль большой оси тела.

2. Максимальная аномалия ВП соответствует хорошо проводящему сфероиду, электропроводность которого должна быть тем выше, чем больше его эксцентриситет. Для плохо проводящего сфероид электропроводность, соответствующая максимуму  $\eta_{ан}$ , обратно пропорциональна эксцентриситету. При очень большой разнице в электропроводности аномалия ВП падает как при очень высокой, так и при низкой электропроводности сфероид по сравнению с электропроводностью вмещающей среды. В среднем наиболее благоприятны условия, когда электропроводность тела на порядок выше электропроводности вмещающей среды. Эти условия часто сопутствуют вкрапленным рудам. Роль вкрапленников является также ведущей в создании аномалий ВП, сопровождающих тела

сплошных руд, окруженных ореолом вкрапленности, причем наличие внутреннего ядра хорошо проводящих руд усиливает аномалию ВП.

3. Для тел, залегающих наклонно по отношению к линии наблюдений и к приложенному полю, характерно смещение максимума аномалии в направлении его падения, если тело обладает хорошей проводимостью, и сохранение положения максимума над «головой» тела, если оно обладает относительно низкой проводимостью. Отличительным признаком хорошо проводящего наклонного сфероидального тела служит также пологий спад максимума  $\eta_{ан}$  в направлении падения тела и минимум  $\eta_{ан}$  за его «головой».

4. Особенно четко влияние формы и электропроводности тела проявляется при сопоставлении графиков  $\eta_k$  и  $\rho_k$ , соответствующих различному положению источника поляризующего тока. Установленные характерные черты графиков  $\eta_k$  для среднего градиента и для расположения токового электрода внутри или вблизи тела дают возможность оценивать форму тела и его протяженность по падению.

### ВП ТЕЛ ПЛАСТОБРАЗНОЙ ФОРМЫ

Форму горизонтально залегающих пластов часто имеют осадочные породы, а крутопадающих пластов — рудные залежи. С математической точки зрения задачи о горизонтально- и вертикально-слоистых средах имеют много общего. Например, измерения на поверхности земли, проводимые над двухслойной горизонтальной структурой, формально эквивалентны измерениям, проводимым по средней линии вертикального пласта, залегающего среди однородных пород. А решение задачи о структуре поля ВП по линии, пересекающей слоистую среду, в равной мере характеризует аномалии, соответствующие наземным измерениям над вертикальными пластами и измерениям в скважинах, пересекающих горизонтальные пласты.

Двухслойная среда

Под такой средой понимается горизонтально залегающий пласт, подстилаемый полубесконечной

однородной средой. Предполагается, что измерения проводятся на поверхности пласта, являющейся границей земля—воздух.

Кажущееся удельное сопротивление в этих условиях для градиент-установки выражается [36] формулой

$$\rho_k = \rho_1 \left[ 1 + 2 \sum_{n=1}^{\infty} K_{12}^n \Phi_n \right], \quad (248)$$

где коэффициент удаления

$$\Phi_n = \frac{1}{\left[ 1 + \left( \frac{2nH_1}{L} \right)^2 \right]^{3/2}} = \frac{1}{[1 + n^2 z^2]^{3/2}}; \quad (249)$$

$$z = 2 \frac{H_1}{L};$$

коэффициент отражения

$$K_{12} = (\rho_2 - \rho_1)/(\rho_2 + \rho_1) = (p - 1)/(p + 1). \quad (250)$$

Применяя к формуле (248) преобразования (149) и (153), получаем точное и приближенное выражения аномальной кажущейся поляризуемости:

$$\eta_{\text{ан}} = \eta_k - \eta_1 = (1 - \eta_1) \frac{2 \sum_{n=1}^{\infty} (\bar{K}_{12}^n - K_{12}^n) \varphi_n}{1 + 2 \sum_{n=1}^{\infty} \bar{K}_{12}^n \varphi_n} \approx$$

$$\approx (\eta_2 - \eta_1) (1 - K_{12}^2) \frac{\sum_{n=1}^{\infty} n K_{12}^{n-1} \varphi_n}{1 + 2 \sum_{n=1}^{\infty} K_{12}^n \varphi_n}, \quad (251)$$

где  $\bar{K}_{12} = (\rho_2^* - \rho_1^*)/(\rho_2^* + \rho_1^*) = (p^* - 1)/(p^* + 1)$ .

При достаточно малом разное  $L$  кажущаяся поляризуемость равна поляризуемости верхнего слоя, а при достаточно большом разное — поляризуемости нижнего слоя, независимо от удельных сопротивлений слоев. Исследование, выполненное Н. А. Пишпаревой [280], показало, что относительное расхождение значений  $\eta_k$ , соответствующих точной и приближенной формулам, не превышает 14–20% при любом разное электродов, если  $\eta_2 - \eta_1 = 40\%$ , а при меньшей поляризуемости слоев погрешность еще меньше.

Исходя из приближенной формулы (154), Н. А. Пишпарева вычислила нормированную аномальную кажущуюся поляризуемость

$$\phi = \frac{\eta_k - \eta_1}{\eta_2 - \eta_1} = (1 - K_{12}^2) \frac{\sum_{n=1}^{\infty} n K_{12}^{n-1} \varphi_n}{1 + 2 \sum_{n=1}^{\infty} K_{12}^n \varphi_n}, \quad (252)$$

не зависящую от поляризуемости слоев, и построила палетки теоретических кривых

$$\eta_k/\eta_1 = 1 + (\eta_2/\eta_1 - 1) \phi \quad (253)$$

для различных отношений  $\eta_2/\eta_1$  и  $\rho_2/\rho_1$ . С помощью кривых  $\rho_k$ , получаемых в процессе работ методом ВП, определяют  $\rho_2/\rho_1$ . Затем по той же методике, путем сравнения экспериментальных кривых с логарифмическими палетками теоретических кривых (253) определяют  $\eta_2$  и  $\eta_1$ . Пример сопоставления практических и теоретических кривых дан на рис. 66. Таблицы значений  $\phi$  [280] и палетки [52] опубликованы.

На практике мощность верхнего слоя и поляризуемости обоих слоев часто определяют без палеток. Верхняя асимптота кривой  $\eta_k$  дает значение  $\eta_1$ , нижняя —  $\eta_2$ . Мощность верхнего слоя оценивают по точке перегиба кривой  $\eta_k$ , которая соответствует разному  $L$ , близкому к значению  $H_1$ , если удельное сопротивление

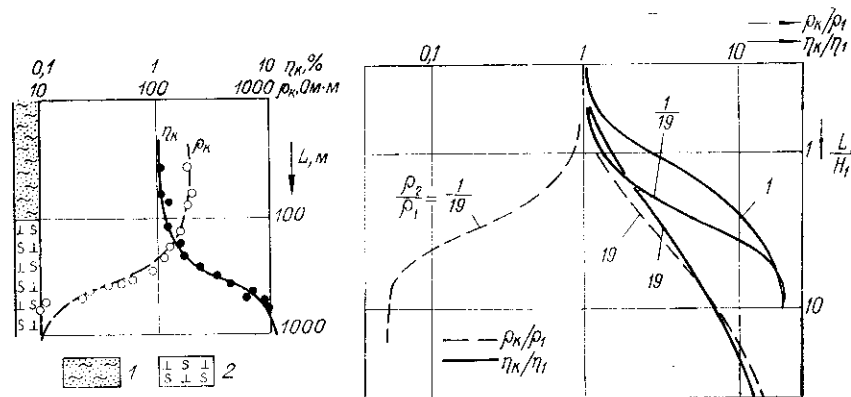


Рис. 66. Теоретические графики  $\eta_k$  и  $\rho_k$  и точки полевых измерений при вертикальном зондировании над двухслойной средой (по Н. А. Пишпаревой).

Породы: 1 — осадочные платформенного чехла ( $\eta_1 = 1,2\%$ ;  $\rho_1 = 200$  Ом·м), 2 — кристаллического фундамента ( $\eta_2 \geq 12\%$ ;  $\rho_2 \leq 5$  Ом·м).

Рис. 67. Теоретические графики  $\rho_k/\rho_1$  и  $\eta_k/\eta_1$  вертикального зондирования над двухслойной средой при различных значениях отношения  $\rho_2/\rho_1$ .

верхнего слоя такое же или больше, чем нижнего. С увеличением удельного сопротивления нижнего слоя по сравнению с верхним разнос, которому отвечает точка перегиба, становится в несколько раз больше, чем  $H_1$  (рис. 67). Зная эти закономерности, после приобретения навыка в интерпретации удастся с удовлетворительной для практики точностью оценивать параметры слоев.

Следует отметить, что с увеличением удельного сопротивления нижнего слоя по сравнению с верхним форма кривых  $\eta_k$  несколько меняется и, что наиболее важно, замедляется выход кривой на асимптоту. В табл. 22 приведены значения разностей  $L/H_1$ , соответствующие заданным  $p$ , и отношения  $\phi_{AB}$ , характеризующего меру приближения  $\eta_k$  при том или ином разное электродов к асимптотическому значению. Согласно табл. 22, при изменении  $p$  от 1 до 39 разнос  $L/H_1$ , требуемый для сохранения значения  $\phi_{AB}$ , увеличивается примерно в 30 раз, т. е. почти пропорционально возрастанию удельного сопротивления нижнего слоя.

Сосчитанные нами теоретические кривые соответствуют установке Шлюмберже, т. е. разностям измерительных электродов, малым по сравнению с  $H_1$ . Чтобы получить выражения  $\rho_k$  и  $\eta_k$  для установки Веннера, надо вместо формулы (249) использовать коэффициенты удаления

$$\varphi_n = \frac{1}{[1 + (2nH_1/l)^2]^{1/2}} - \frac{1}{[1 + (nH_1/l)^2]^{1/2}}, \quad (254)$$

где  $l = AM = MN = NB$ .

Все остальное в формулах (248) и (251) остается без изменений. В качестве абсциссы, сопоставляемой с  $L/H_1$ , в установке Веннера

ТАБЛИЦА 22  
Разносы токовых электродов  
(в единицах мощности наносов)

| $\rho_2/\rho_1$ | $\Phi_{AB}$ |     |     |     |     |     |
|-----------------|-------------|-----|-----|-----|-----|-----|
|                 | 0,95        | 0,9 | 0,8 | 0,7 | 0,6 | 0,5 |
| 1,0             | 11          | 7,5 | 5   | 4   | 3   | 2,5 |
| 1,5             | 15          | 10  | 6,5 | 5   | 3,5 | 3   |
| 2,3             | 30          | 17  | 10  | 7   | 5   | 3,5 |
| 4               | 50          | 25  | 15  | 10  | 7,5 | 5,5 |
| 9               | 95          | 57  | 35  | 23  | 15  | 11  |
| 19              | 200         | 125 | 75  | 50  | 37  | 25  |
| 39              | 400         | 250 | 150 | 100 | 70  | 48  |

служит  $3I/(2H_1)$ ; графики  $\Phi$  для установки Веннера были опубликованы Г. Сигелом [404]. Сопоставление кривых  $\Phi$  для обеих установок показало [280], что, хотя значение  $\eta_k$  для установки Шлюмберже всегда несколько больше, чем для установки Веннера, различие практически несущественно. Исходя из этого, можно заключить, что увеличение  $MN$  до  $AB/3$  не вносит серьезных изменений в кривые  $\eta_k$ , соответствующие двухслойной горизонтальной структуре.

Задача о двухслойной среде применительно к измерениям в вертикальной скважине рассмотрена в литературе [145, 268].

В многослойной структуре значение кажущегося сопротивления можно определить из следующей формулы:

$$\rho_k = \rho_1 \left[ 1 + 2 \sum_{n=1}^{\infty} b_n \Phi_n \right], \quad (255)$$

где  $b_n$  — так называемые коэффициенты эмиссии, в общем случае сложным образом зависящие от мощности и удельного сопротивления всех слоев [36].

С помощью преобразований (146) и (151) из формулы (255) находят точное или приближенное выражение кажущейся поляризуемости. Используя имеющиеся палетки  $\rho_k$  для разных сопротивлений слоев, Н. А. Пишпарева [280] графическим способом вычислила производные  $\partial \rho_k / \partial \rho_2$ , а затем по формуле (146) нашла значения  $\eta_k$  для разных сопротивлений среднего слоя (удельное сопротивление верхнего и нижнего слоев было принято одинаковым). В результате получен набор теоретических кривых для разных поляризуемостей и сопротивлений слоев, альбом которых опубликован [52].

На рис. 68 показана серия кривых  $\Phi$ , соответствующих разной мощности среднего слоя при одинаковом удельном сопротив-

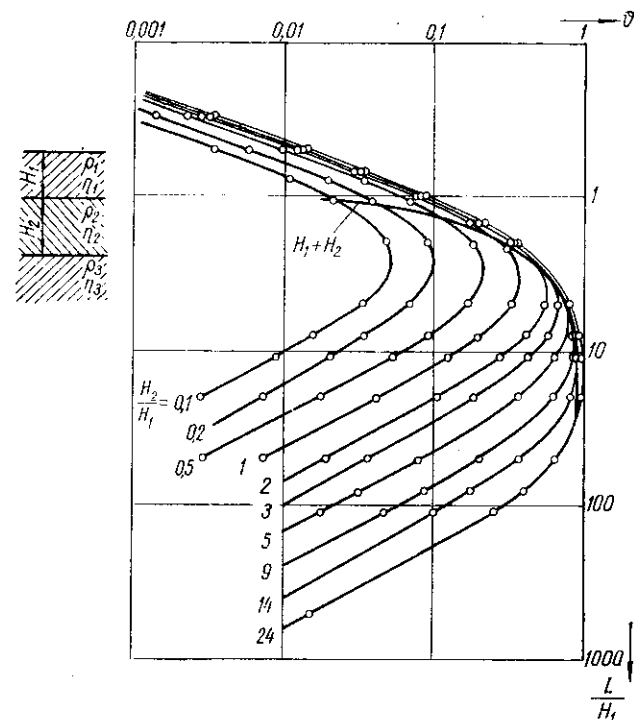


Рис. 68. Теоретические графики  $\Phi$  для вертикального зондирования над горизонтальным пластом.

$$\rho_3 = \rho_2 = \rho_1; \eta_3 = \eta_1.$$

лении всех слоев и одинаковой поляризуемости верхнего и нижнего слоев. Анализ этих кривых показал, что максимальное значение  $\Phi$  прямо пропорционально полумощности рассматриваемого горизонтального пласта, отнесенной к глубине его центра. Аналогичный анализ зависимости максимума  $\Phi$  от полумощности пласта при различном удельном сопротивлении последнего показал, что эта зависимость аппроксимируется степенной функцией, поскольку в двойном логарифмическом масштабе она отображается прямыми линиями (рис. 69). Таким образом, интенсивность максимума  $\Phi$  для горизонтального пласта, не отличающегося по электропроводности, выражается формулой

$$\Phi_{\max} = \frac{\eta_{k \max} - \eta_1}{\eta_2 - \eta_1} = \left( \frac{\frac{1}{2} H_2}{H_1 + \frac{1}{2} H_2} \right)^m, \quad (256)$$

где  $H_1, H_2$  — мощность верхнего и среднего слоя (пласта);  $m$  с возрастанием абсолютного значения  $K_{12}$  от 0 до 0,9 уменьшается от 1 до 0,4.

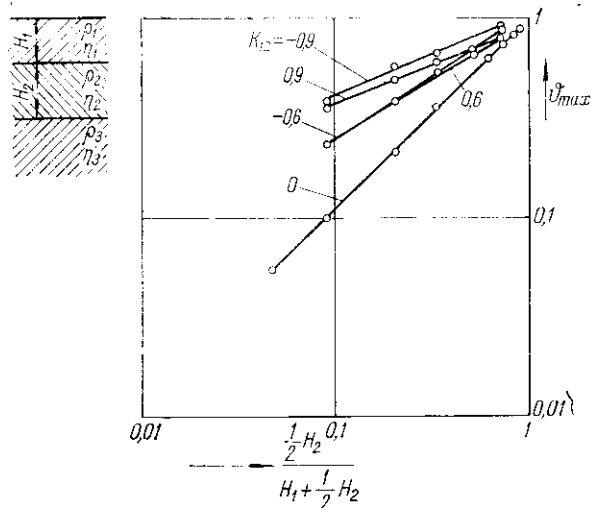
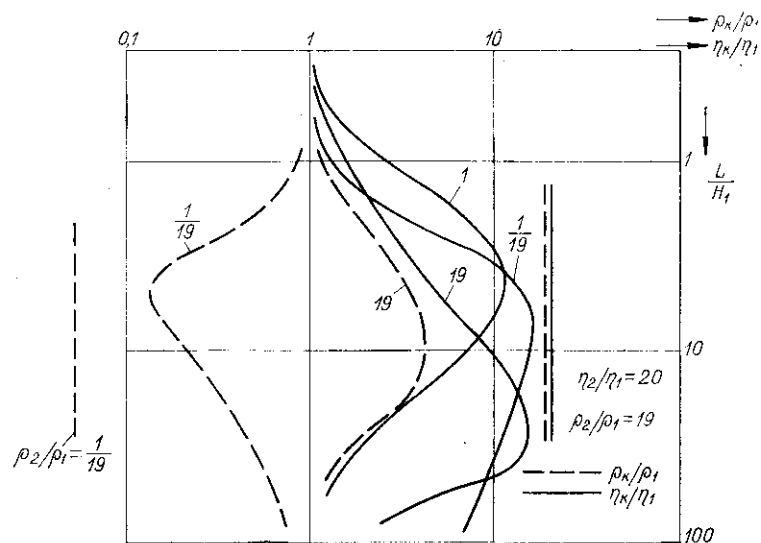


Рис. 69. Зависимость максимального значения  $\Phi$  при вертикальном зондировании над горизонтальным пластом от отношения полумощности пласта к глубине его центра.

$$\rho_2 = \rho_1; \eta_2 = \eta_1.$$

Рис. 70. Теоретические графики  $\rho_k/\rho_1$  и  $\eta_k/\eta_1$  вертикального зондирования над горизонтальным пластом.

$$H_2 = 2H_1; \eta_2 = 20\eta_1.$$



Согласно формуле (256) и графикам на рис. 70, как хорошо, так и плохо проводящий пласт отмечаются максимумами  $\eta_k$ , которые тем ближе подходят к истинной поляризуемости пласта, чем резче они выделяются по удельному сопротивлению от вмещающих пород. Одновременно верхняя ветвь кривых  $\eta_k$  все полнее сливается с кривой  $\eta_k$ , соответствующей двухслойной среде с теми же электрическими свойствами второго слоя. Отсюда следует вывод, который можно обосновать более строго, что чем резче второй слой по удельному сопротивлению отличается от первого, тем на меньшую глубину «зондируется» второй слой, а исследования больших глубин становятся менее доступными.

В формуле (256) указана только интенсивность максимума  $\eta_k$ . Разнос  $L$ , при котором наблюдается максимум, возрастает по мере увеличения разницы в удельном сопротивлении пласта и вмещающей среды, причем особенно резко, когда пласт обладает относительно высоким сопротивлением. В итоге разнос, соответствующий максимуму  $\eta_k$  при зондировании над плохо проводящим пластом, становится на порядок больше, чем над той же мощности пластом, не отличающимся по удельному сопротивлению от вмещающей среды (рис. 70).

Способ расчета с помощью ЭВМ кривых  $\eta_k$  для зондирования над горизонтально-слоистой средой

предложили в 1961 г. Л. Л. Ваньян, Г. М. Морозова и Л. В. Ложеницына [39]. Он является развитием способа, ранее разработанного Л. Л. Ваньяном для расчета кривых  $\rho_k$ .

В настоящее время используют несколько способов машинной интерпретации кривых  $\eta_k$  и  $\rho_k$  вертикального зондирования по программам, составленным Е. Б. Изотовой, Л. В. Егоровой, А. А. Рыжовым и другими. Программы автоматически подбирают такую модель многослойной среды, поле ВП в которой с наперед заданной точностью соответствует измеренному. Алгоритм направленного подбора минимизирует сумму квадратов относительных расхождений вычисленных и измеренных значений интерпретируемых параметров. Для сужения действия принципа эквивалентности и повышения достоверности интерпретации (помимо значений  $\eta_k$  и  $\rho_k$  на заданных разносах электродов) обязательно используют априорные сведения о геологическом разрезе.

Надо отметить, что различия слоев по удельному сопротивлению значительно усложняют соотношения кажущейся поляризуемости с истинной поляризуемостью слоев. З. Д. Круглова обнаружила, что в трехслойном разрезе типа К или Q  $\eta_k$  может превысить истинную поляризуемость среднего слоя, если она выше, чем у соседних слоев, или оказаться ниже поляризуемости этого слоя, если она минимальна в разрезе. Это означает, что в таких условиях значение приведенной аномальной поляризуемости  $\Phi$  отрицательно. Американские геофизики [378] подробно изучили появление отрицательных аномалий ВП в слоистых

ТАБЛИЦА 23  
Коэффициенты удаления  $\varphi_i(z)$

| $z$            | 0,001  | 0,02   | 0,05   | 0,10   | 0,20   | 0,50   | 1,00    |
|----------------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|---------|
| $\varphi_i(z)$ | 0,9998 | 0,9976 | 0,9852 | 0,9428 | 0,8004 | 0,3535 | 0,08944 |

| $z$                         | 1    | 2    | 5     | 10    | 20    | 50      | 100    |
|-----------------------------|------|------|-------|-------|-------|---------|--------|
| $\varphi_i^*(z) \cdot 10^5$ | 8944 | 1427 | 98,52 | 12,45 | 1,561 | 0,09998 | 0,0125 |

средах путем анализа уравнения (151). В частности, они обратили внимание, что значения  $\eta_k$  на разностях, соответствующих наибольшему влиянию среднего слоя, могут быть отрицательными, если сопротивление верхнего слоя невелико, а поляризуемость выше, чем нижних слоев. В разрезах типа  $H$  и  $A$  подобные аномалии ВП не наблюдаются. Для правильной интерпретации зондирования методом ВП необходим учет распределения удельных сопротивлений в разрезе.

Если слои по удельному сопротивлению различаются слабо, то интерпретация кривых  $\eta_k$  значительно упрощается. Н. А. Пишпарева [280] показала, что в этом случае кажущуюся поляризуемость можно вычислить по формуле

$$\eta_k = \sum_{i=1}^N \eta_i (\varphi_i - \varphi_{i+1}) = \eta_1 + \sum_{i=2}^N (\eta_i - \eta_{i+1}) \varphi_i, \quad (257)$$

где  $N$  — число слоев;  $\eta_i$  — поляризуемости слоев; коэффициент удаления  $\varphi_i = (1 + z_i^3)^{-3/2}$ ;  $z_i = 2H_i/L$ ;  $H_i$  — глубина кровли слоя с номером  $i$ ;  $L = AO$  — расстояние от токового электрода до центра измерительной линии для трехэлектродной или симметричной четырехэлектродной установки.

Для верхнего слоя  $i = 1$ ;  $H_1 = 0$  и  $\varphi_1 = 1$ . Если  $i = N$ , то  $\varphi_{N+1} = 0$ , так как глубина  $H_{N+1}$  бесконечно велика по сравнению с разностью  $L$ . Значения  $\varphi_i$  приведены в табл. 23.

Для приближенной интерпретации кривых  $\eta_k$  А. М. Ярославцев [324, 325] предложил использовать палетки  $\rho_k$ . При этом процедура интерпретации складывается из пяти этапов:

1) по измеренным в ходе полевых работ значениям  $\eta_k$  и  $\rho_k^*$  вычисляют кажущееся удельное сопротивление, соответствующее первичному полю:  $\rho_k = \rho_k^* (1 - \eta_k)$ ;

2) вычисляют  $\rho_k^{**}$ , которое имело бы место в конце зарядки при высокой поляризуемости всей среды, если бы поляризуемость каждого слоя увеличилась в  $n$  раз:  $\rho_k^{**} = \rho_k / (1 - n\eta_k)$ ;

3) кривые  $\rho_k$  и  $\rho_k^{**}$  интерпретируют по имеющимся палеткам и определяют параметры слоев;

4) по найденным значениям  $\rho_i$  и  $\rho_i^{**}$  для каждого слоя вычисляют фиктивную поляризуемость  $\eta_i^{**} = (\rho_i^{**} - \rho_i) / \rho_i^{**}$ ;

5) найденные значения фиктивной поляризуемости уменьшают в  $n$  раз и тем самым отыскивают истинную поляризуемость каждого слоя  $\eta_i = \eta_i^{**} / n$ .

Практическое применение этого способа, по свидетельству А. М. Ярославцева, дало удовлетворительные результаты.

Вертикальный контакт  
двух сред

На контакте двух сред кажущееся удельное сопротивление можно определить из следующей формулы:

$$\rho_k = \rho_1 (1 + K_{12} F_x), \quad (258)$$

где  $F_x$  — функция координат контакта и электродов, которая, например, для трехэлектродной градиент-установки, расположенной перпендикулярно к контакту, равна [36, 82, 160]  $F_x = -x^2 / (2d - x)^2$ , если все электроды расположены в среде с удельным сопротивлением  $\rho_1$ . Если токовый электрод расположен в одной среде, а измерительные в другой, то  $F_x = 1$  ( $x$  — расстояние от источника тока до центра измерительной линии;  $d$  — расстояние от источника тока до контакта).

Из формулы (258) с помощью преобразования (154) получаем

$$\vartheta = \frac{\rho_1}{\rho_k} (1 - K_{12}^2) \frac{F_x}{2} = \frac{1 - K_{12}^2}{1 + K_{12} F_x} \cdot \frac{F_x}{2}. \quad (259)$$

По мере перемещения измерительных электродов к контакту при неподвижном токовом электроде абсолютное значение  $F_x$  возрастает. При  $x = d$   $F_x = -1$ , тогда

$$\vartheta = -(1 + K_{12}^2) / 2 = -\rho_2 / (\rho_2 + \rho_1), \quad (260)$$

а после пересечения контакта

$$\vartheta = (1 - K_{12}^2) / 2 = \rho_1 / (\rho_2 + \rho_1). \quad (261)$$

Скачок  $\vartheta$  на контакте сред равен единице, независимо от соотношения их удельного сопротивления. Это равносильно скачку кажущейся поляризуемости на значение разности поляризуемости сред

$$\eta_k^{(1)} - \eta_k^{(2)} = \eta_1 - \eta_2.$$

Если токовый и измерительные электроды разделены контактом, то, согласно формуле (261), кажущаяся поляризуемость составляет некоторое среднее значение между поляризуемостями обеих сред, причем  $\eta_k$  оказывается ближе к поляризуемости той среды, удельное сопротивление которой меньше. Если  $\rho_1 = \rho_2$ , то  $\eta_k = (\eta_1 + \eta_2) / 2$ .

Теоретические графики  $\rho_k$  сосчитаны для разных соотношений удельных сопротивлений сред [82, 99]. С их помощью можно

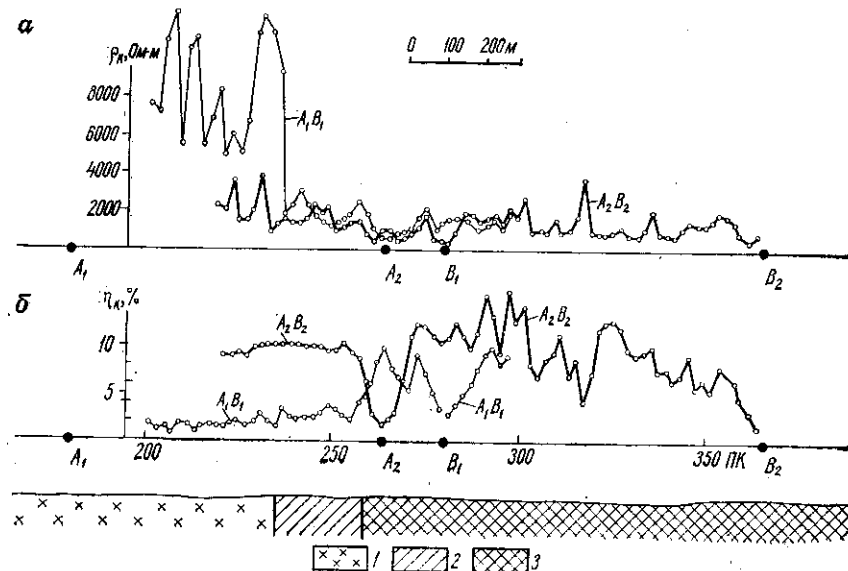
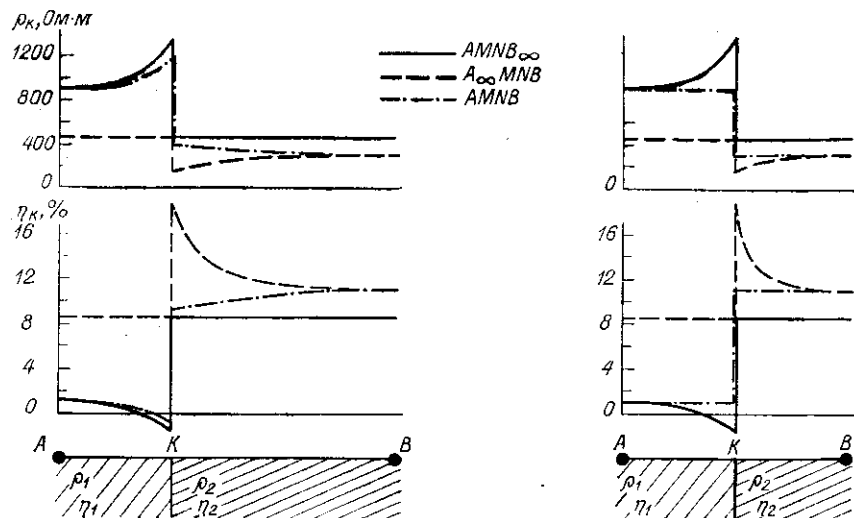


Рис. 71. Теоретические графики  $\eta_k$  и  $\rho_k$  над контактом двух сред для градиент-установки при различном положении контакта между токовыми электродами.  $\rho_1 = 900 \text{ Ом}\cdot\text{м}$ ;  $\rho_2 = 300 \text{ Ом}\cdot\text{м}$ ;  $\eta_1 = 1\%$ ;  $\eta_2 = 11\%$ .

Рис. 72. Полевые графики  $\rho_k$  (а) и  $\eta_k$  (б) над вертикально-слоистой структурой при разном положении питающих электродов (по материалам Западного геофизического треста).  
1 — гнейсо-граниты; 2 — слюдяные сланцы; 3 — роговообманковые сланцы.

получить графики  $\eta_k$ , минуя вычисления функции  $F_x$ . Если  $K_{12} = 1/2$  (тогда  $\rho_2/\rho_1 = 3$ ), то  $F_x/2 = [\rho_k/\rho_1 - 1]_{K_{12}=1/2}$ . Подставив значение  $F_x/2$  в формулу (259), получим

$$\Phi = \frac{\rho_1}{\rho_k} (1 - K_{12}^2) \left[ \frac{\rho_k}{\rho_1} - 1 \right]_{K_{12}=1/2}. \quad (262)$$

Таким образом, для вычислений  $\Phi$  достаточно знать отношение  $\rho_k/\rho_1$ , соответствующее заданному коэффициенту отражения, и  $\rho_k/\rho_1$ , соответствующее  $K_{12} = 1/2$ .

На рис. 71 приведены графики  $\rho_k$  и  $\eta_k$  для градиент-установки при контакте  $K$ , находящемся посередине между электродами  $A$  и  $B$  или смещенном в сторону электрода  $A$  ( $AK = 1/2 KB$ ). Вычисления выполнены для отдельных электродов  $A$  и  $B$  (установки  $AMNB_\infty$  и  $A_\infty MNB$ ) и для суммарного поля обоих электродов (установка  $AMNB$ ). Принято, что  $\rho_1 > \rho_2$  и  $\eta_1 < \eta_2$ . Подобные условия встречаются на контакте безрудных пород и пород с вкрапленностью электропроводящих минералов.

Графики  $\eta_k$  при переходе из среды с низкой поляризуемостью в среду с высокой поляризуемостью по форме весьма сходны с теми графиками  $\rho_k$ , которые соответствуют переходу из среды с низким сопротивлением в среду с высоким сопротивлением. При удалении одного из токовых электродов на «бесконечность»  $\eta_k$  достигает значения истинной поляризуемости лишь в той среде, где находится ближний токовый электрод, а в другой среде может резко отличаться от истинной поляризуемости. Столь же резкое различие кажущейся и истинной поляризуемости наблюдается при измерениях с дипольной токовой установкой, если токовый диполь расположен в одной среде, а измерительный — в другой.

Примером служат приведенные на рис. 72 полевые графики  $\eta_k$  и  $\rho_k$ . При измерениях внутри линии  $A_1B_1$  на графиках  $\eta_k$  четко проявился контакт рудоносных слюдяных сланцев с роговообманковыми сланцами, а на графиках  $\rho_k$  — контакт слюдяных сланцев с гнейсо-гранитами. При измерениях вне линии  $A_2B_2$ , когда оба токовых электрода были внутри рудоносной пиритизированной зоны, повышенные значения  $\eta_k$  и пониженные значения  $\rho_k$  наблюдались над гнейсо-гранитами, имеющими низкую поляризуемость и высокое удельное сопротивление.

Роль контактов различных по электрическим свойствам пород особенно велика при скважинных измерениях [145, 268].

Вертикальный пласт  
в однородном поле

Если принять, что пласт содержит вкрапленность рудных минералов, но не отличается по удельному сопротивлению от вмещающих пород и расстояние токовых электродов от пласта достаточно велико, чтобы считать поляризующее поле в районе пласта однородным, то для решения задачи можно воспользоваться формулой (98), которая аналогична применяемой в теории магниторазведки. Эта формула учитывает взаимодействие полей ВП

и  $\eta_k$ . При измерениях внутри линии  $A_1B_1$  на графиках  $\eta_k$  четко проявился контакт рудоносных слюдяных сланцев с роговообманковыми сланцами, а на графиках  $\rho_k$  — контакт слюдяных сланцев с гнейсо-гранитами. При измерениях вне линии  $A_2B_2$ , когда оба токовых электрода были внутри рудоносной пиритизированной зоны, повышенные значения  $\eta_k$  и пониженные значения  $\rho_k$  наблюдались над гнейсо-гранитами, имеющими низкую поляризуемость и высокое удельное сопротивление.



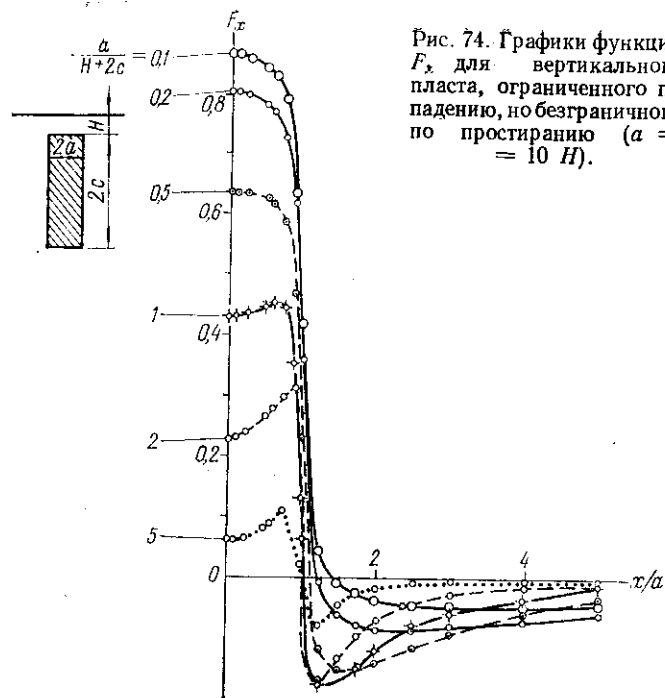


Рис. 74. Графики функции  $F_x$  для вертикального пласта, ограниченного по падению, но безграничного по простиранию ( $a = 10 H$ ).

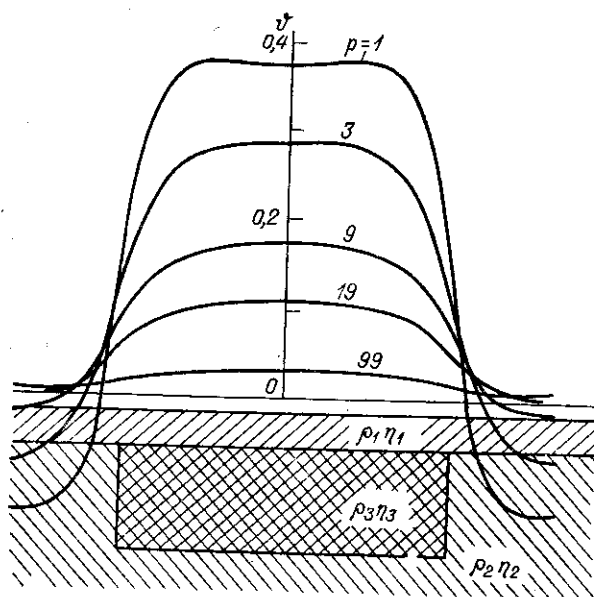


Рис. 75. Теоретические графики  $\phi$  над пластообразным телом при различном отношении удельных сопротивлений коренных пород и «наносов». Поляризующее поле однородно (по М. В. Семенову).  
 $\rho_2 = \rho_1$ ;  $\eta_2 = \eta_1$ ;  
 $\rho_2/\rho_1 = \rho$ .

ТАБЛИЦА 24

Значения  $\phi_{\max}$  для вертикального, безграничного по падению и простиранию пласта, перекрытого наносами (по М. В. Семенову)

| $\rho_2/\rho_1$ | $a/H$ |       |       |       |       |       |       |       |          |
|-----------------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|----------|
|                 | 0     | 0,25  | 0,5   | 1     | 2     | 5     | 10    | 100   | $\infty$ |
| 1,0             | 0     | 0,155 | 0,290 | 0,500 | 0,710 | 0,870 | 0,930 | 0,994 | 1        |
| 1,22            | 0     | 0,145 | 0,275 | 0,470 | 0,670 | 0,851 | 0,922 | 0,991 | 1        |
| 1,5             | 0     | 0,134 | 0,254 | 0,437 | 0,632 | 0,823 | 0,906 | 0,988 | 1        |
| 3,0             | 0     | 0,097 | 0,186 | 0,326 | 0,494 | 0,705 | 0,837 | 0,980 | 1        |
| 9,0             | 0     | 0,050 | 0,098 | 0,176 | 0,287 | 0,472 | 0,626 | 0,943 | 1        |
| 12,3            | 0     | 0,041 | 0,079 | 0,144 | 0,238 | 0,407 | 0,557 | 0,925 | 1        |
| 19,0            | 0     | 0,030 | 0,058 | 0,107 | 0,181 | 0,322 | 0,462 | 0,885 | 1        |
| 39,0            | 0     | 0,017 | 0,034 | 0,063 | 0,108 | 0,209 | 0,318 | 0,789 | 1        |
| 99,0            | 0     | 0,008 | 0,016 | 0,030 | 0,055 | 0,108 | 0,178 | 0,598 | 1        |

Максимальные значения  $\phi$  над серединой пласта, безграничного по простиранию и в глубину и выходящего под «наносы», приведены в табл. 24 для разных соотношений удельных сопротивлений и горизонтальной мощности пласта. С помощью табл. 24 можно оценить аномалию ВП, ожидаемую в тех или иных условиях. Например, из табл. 24 следует, что при  $\eta_{\text{нзб}} = 10\%$  и  $\rho_2/\rho_1 = 20$  аномалию  $\eta_k = 1\%$  можно получить, если горизонтальная мощность пласта в 2—3 раза больше мощности наносов. Следовательно, зоны сульфидной минерализации шириной 200—300 м, сопровождающие промышленные месторождения, можно обнаружить под хорошо проводящими наносами с мощностью до 100—200 м. Однако при этом разность токовых электродов, в согласии с данными табл. 22, должны быть не менее 10—20 км.

#### Профилирование над пластом

Теоретически задача сводится к вычислению аномалии ВП для поля точечного источника, произвольно расположенного по отношению к пласту. Если пласт не перекрыт «наносами», то задача не очень сложная и для аномалий  $\rho_k$  решена. Более сложный случай пласта, перекрытого «наносами», требует громоздких вычислений, и ответ можно получить с помощью ЭВМ. Ту же цель можно достичь путем моделирования.

Вычислить  $\eta_k$  легко, если известны аномалии  $\rho_k$  для разных соотношений удельных сопротивлений пласта и вмещающих пород. При этом безразлично, как получены графики  $\rho_k$ : теоретическими расчетами или путем моделирования. Вычисляют  $\eta_k$  по формулам (146) или (155). Применение формулы (146) было проиллюстрировано на примерах зондирования над горизонтально-слоистыми средами. Применение выражения (155) покажем ниже.

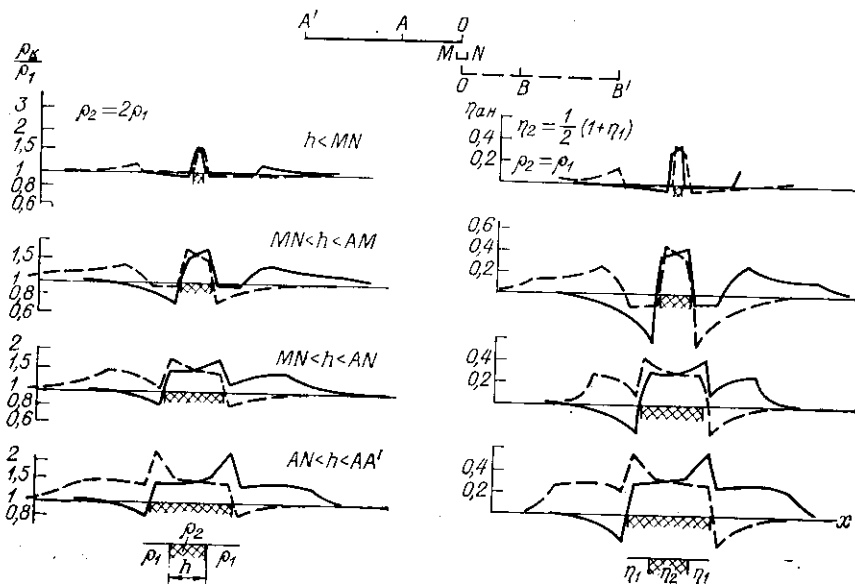


Рис. 76. Теоретические графики  $\rho_k/\rho_1$  и  $\eta_{an}$  дипольного профилирования над вертикальным пластом. Графики  $\rho_k$  соответствуют  $\rho_2 = 2\rho_1$ ; графики  $\eta_{an}$  соответствуют  $\rho_2 = \rho_1$ ,  $\eta_{изб} = 50\%$ .

В книге И. М. Блоха [30] приведены теоретические графики  $\rho_k$  дипольного профилирования над вертикальным пластом, в том числе для пласта, удельное сопротивление которого в 2 раза больше, чем у вмещающей среды. Преобразование этих графиков по формуле (155) приводит к графикам  $\eta_k$ , соответствующим пласту, поляризуемость которого  $\eta_2 \approx 56\%$ , а удельное сопротивление то же, что у вмещающей среды. Полученные графики  $\eta_k$  вместе с исходными  $\rho_k$  приведены на рис. 76. Качественный облик тех и других весьма сходен, положение экстремумов одно и то же. Немного различаются лишь соотношения максимумов и минимумов. Поэтому практически можно считать, что графики  $\eta_k$  над телами вкрапленных руд по форме аналогичны графикам  $\rho_k$  над такими же телами плохих проводников.

При истолковании графиков  $\eta_k$  можно использовать те закономерности, которые установлены для графиков  $\eta_k$  над плохо проводящими телами. В качестве примера на рис. 77 приведены полевые графики  $\eta_k$  комбинированного профилирования над рудной зоной. Используя выводы И. М. Блоха [30], касающиеся положения экстремальных точек и других особенностей графиков  $\eta_k$ , можно полагать, что минимум  $\eta_k$  для установки  $OB$  на ПК 35 расположен над одной из границ рудной зоны, а несколько слабее выраженный минимум  $\eta_k$  для установки  $AO$  на ПК 100 — над другой границей, имеющей падение в сторону возрастания номера пикетов. Ширина рудной зоны превышает разнос  $AO$  в несколько

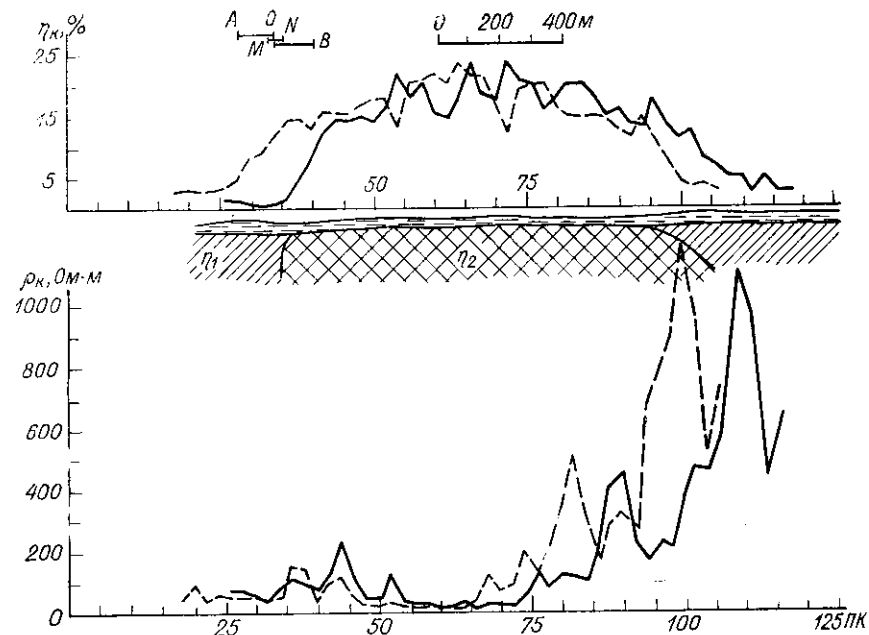


Рис. 77. Полевые графики  $\eta_k$  и  $\rho_k$  комбинированного профилирования над рудной зоной (по материалам Мугоджарской геофизической экспедиции). Схематический разрез составлен по результатам интерпретации графиков  $\eta_k$  ( $AO = 120$  м;  $MN = 40$  м;  $\eta_1 = 2,5\%$ ;  $\eta_2 = 25\%$ ).

раз, и значения  $\eta_k$  в центре аномалии, очевидно, близки к истинной поляризуемости зоны.

Границы рудных зон по графикам комбинированного профилирования можно установить при условии, что установка  $AO = OB$  в несколько раз меньше ширины зоны. В иных случаях можно установить лишь центр зоны по «обратному» пересечению графиков  $\eta_k$ , аналогичному «обратному» пересечению графиков  $\rho_k$  над плохим проводником.

Графики  $\eta_k$ , соответствующие профилированию над вертикальным пластом с установкой Веннера, вычислил М. Дизиглу [351, 352].

## ВЫВОДЫ

1. Разработанные способы вычислений теоретических кривых кажущейся поляризуемости позволяют довольно просто получить палетки кривых вертикального зондирования методом ВП над теми структурами, для которых созданы палетки  $\rho_k$ . Кроме того, для горизонтально-слоистых структур, элементы которых различаются по поляризуемости, но не по удельному сопротивлению, обоснован способ вычислений кажущейся поляризуемости, требующий элементарных арифметических операций с таблицей коэффициентов удаления.
2. Графики  $\eta_k$  комбинированного и другого вида профилирования можно интерпретировать на основе известных закономерностей формы графиков  $\rho_k$ , соответствующих плохо проводящим телам.

3. Установлены количественные взаимоотношения между аномалиями ВП и параметрами пласта (мощностью, глубиной залегания, поляризуемостью, электропроводностью), с помощью которых можно оценить ожидаемые для тех или иных условий аномалий ВП и проинтерпретировать полевые данные.

4. Найдены простые приемы определения глубины залегания пластов и их горизонтальной мощности по точкам перегиба графиков  $R_k$  зондирования и «срединного градиента».

## ВП ВЫТЯНУТЫХ ТЕЛ С ПРОИЗВОЛЬНЫМ СЕЧЕНИЕМ

В начале настоящей главы отмечалось, что ВП тела, не отличающегося по значению электропроводности от вмещающей среды, формально аналогична намагничиванию тела. В обоих случаях задача сводится к вычислению однотипного интеграла (91). Входящая в формулу (85) поляризационная восприимчивость  $s$  является аналогом магнитной восприимчивости  $\chi$ :

$$J = \chi T, \quad (270)$$

где  $J$  — интенсивность намагничивания;  $T$  — полный вектор магнитного поля.

В свою очередь, с при отыскании аномального поля ВП увязывается с избыточной поляризуемостью тела:  $s = [1/(4\pi)] \eta_{изб}$ .

Большинство задач, решенных в теории магниторазведки, относится к телам, весьма вытянутым по простиранию, так что аномальное поле, наблюдаемое над средней частью тела, считается не зависящим от координаты, ориентированной по его простиранию. В условиях такой «двумерной» задачи связь составляющих поля электрического или магнитного диполя оказывается весьма простой: горизонтальная составляющая напряженности поля при одном положении оси диполя по абсолютному значению равна вертикальной составляющей после поворота оси на  $90^\circ$ . Вследствие этого для одинаковых по форме тел графики вертикальной составляющей аномального магнитного поля, соответствующие вертикальному намагничиванию, аналогичны графикам горизонтальной составляющей поля ВП, соответствующим однородному горизонтальному поляризующему полю.

Указанное сходство графиков, естественно, породило стремление использовать готовые палетки магнитных полей для интерпретации аномалий ВП. Так поступил, в частности, В. А. Белаш [23, 24] при обосновании способа интерпретации графиков  $\eta_k$ , получаемых над вертикальными пластами.

Для вычисления магнитного поля, создаваемого телом, имеющим произвольное по форме, но выдержанное по простиранию сечение, широко применяется палетка Д. С. Микова [194]. М. В. Семенов [52, 280] исследовал применимость этой палетки для условий метода ВП и вычислил поправочные коэффициенты, с помощью которых палетку Д. С. Микова можно использовать не только при однородном в пределах тела поляризующем поле,

но и при неоднородном поле точечных источников тока и для тела, ограниченного по простиранию.

В заключение отметим, что уровень разработки теории полей, соответствующих однородному намагничиванию, весьма высок в магниторазведке и пока далеко не исчерпаны возможности переноса готовых решений в раздел теории метода ВП, касающийся однородной поляризации тел. С другой стороны, в теории метода ВП глубже разработан раздел, касающийся неоднородной поляризации тел, и эти данные, в принципе, могут найти применение в теории магниторазведки.

## Моделирование ВП рудных тел

Моделирование служит важным средством проверки тех или иных теоретических предположений и разработки способов истолкования полевых наблюдений, особенно в сложной обстановке, когда теоретические расчеты затруднительны. Для того чтобы результаты модельных исследований можно было применять при анализе полевых материалов, необходимо выполнить ряд условий, характеризующих критерии подобия.

Г. П. Саковцев [245], Ю. С. Рысс [239], Ж. Руссель [397] и другие исследователи в качестве моделей рудных тел использовали металлические или сульфидные пластинки, помещенные в бак с водой, песком или глиной. Ю. П. Булашевич [34, 35] первым обратил внимание на критерии подобия полей ВП. Он указал, что при моделировании полей ВП, присущих электронным проводникам, необходимо сохранять одинаковым дипольный момент тела, что для тел сферической формы означает

$$ap_1/\chi = a/\lambda = \text{const}, \quad (271)$$

где  $a$  — радиус сферы;  $p_1$  — удельное сопротивление вмещающей среды;  $\chi$  и  $\lambda$  — коэффициенты поверхностной ВП.

Критерий (271) является дополнением к тому, что при моделировании должны быть выдержаны соотношения удельных сопротивлений тела и вмещающей среды и геометрическое подобие модели рудному телу, т. е. сохранены соотношения размеров, формы и глубины тел, а также разностей электродов. Кроме того, плотность поляризующего тока должна быть небольшой, чтобы коэффициенты  $\chi$  и  $\lambda$  не зависели от плотности тока.

Для выполнения условий формулы (271) резкое различие значений  $a$  в лабораторных и полевых условиях необходимо компенсировать подбором состава электронного проводника и вмещающей среды или изменением моментов отсчета ВП. Практически проще сохранять не дипольный момент поляризуемых тел, а значение измеряемого поля ВП, изменяя соотношение размера тела и расстояния от него линии наблюдений. В рассматриваемом

простейшем случае электропроводящего сферического тела в качестве такого критерия подобия имеем

$$a^2\lambda/h^3 = \text{const}, \quad (272)$$

где  $h$  — глубина центра сферы.

Временная зависимость  $\lambda$  описана выше, ее связь с  $a$  не играет существенной роли, если измерять полное поле ВП при длительной зарядке, обеспечивающей «насыщение» ВП как в лабораторных, так и в полевых условиях.

К примеру, если для лабораторных условий принять  $a = 5$  см;  $h = 40$  см;  $\lambda = 10$  см, то при постоянном значении  $\lambda$  такой модели будет соответствовать рудное тело при  $a = 5$  м и  $h = 8,5$  м. Глубина модели превышает ее радиус в 8 раз. Для полевого эквивалента глубина тела должна быть больше его радиуса лишь в 1,7 раза. При одинаковом соотношении размера и глубины электронного проводника аномалия ВП в лабораторных условиях во много раз больше, чем в полевых.

Критерий подобия полей ВП электронных проводников существенно зависит от формы тела. Для сфероидальных тел о нем можно судить по формулам (231), (233). Для примера рассмотрим дискообразное тело, ориентированное перпендикулярно к приложенному полю. Тогда  $G = 2/\pi \cdot a/c \gg 1 > p$ ;  $\Delta p = (\lambda_\infty/c)F(T)$ , из формулы (231) имеем

$$U_{\text{ВП}} = - \frac{\Delta p G N V E_0 F(x, z)}{4\pi(G + \Delta p)} \approx \frac{1}{3} \lambda_\infty a^2 F(T) N E_0 F(x, z), \quad (273)$$

где  $V = \frac{4}{3}\pi a^2 c$ ;  $a$  — радиус диска;  $c$  — толщина диска на его оси.

В этом случае достаточно выдержать геометрическое подобие. Такой же вывод следует из формулы (89), описывающей поле ВП тонкого листа, ориентированного перпендикулярно к токовому полю. Тогда критерий подобия выражается формулой

$$\lambda\Omega = \text{const}, \quad (274)$$

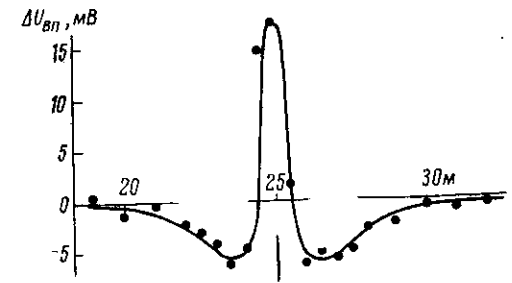
где  $\Omega$  — телесный угол, под которым поляризованная поверхность видна из точки наблюдения.

Соответствие теоретических расчетов экспериментальным данным для электропроводящей сферы показано выше (рис. 47).

Исследования поля ВП тонкого листа выполнены сотрудниками ВИТР в 1954 г. Железный лист размером  $136 \times 60$  см был закопан в землю вертикально так, что его большая сторона была параллельна поверхности земли и находилась на глубине 20 см. Токовые электроды находились на расстоянии 10 м по обе стороны от листа и создавали в нем однородное возбуждающее поле. Сила тока составляла 5 А; средняя плотность тока у листа  $1,6$  мкА/см<sup>2</sup>; удельное сопротивление грунта, в который был закопан лист,  $70$  Ом·м; напряженность поляризуемого поля  $E_0 = 11,2$  мВ/см. Поляризуемость грунта при  $t_3 = 2$  мин;  $t = 0,5$  с составляла около 1%.

На рис. 78 приведены экспериментальный и теоретический графики  $\Delta U_{\text{ВП}}$ . Теоретическая кривая рассчитана по формуле (89) с удвоением аномального потенциала для учета границы земля—воздух. Для того чтобы амплитуды графиков совпали, взяли  $\tau = 3,5$  мВ. Соответствующую ей э. д. с. ВП находим по фор-

Рис. 78. Теоретический график и точки экспериментальных измерений  $\Delta U_{\text{ВП}}$  по профилю вкrest простираения железного листа, закопанного в землю ( $MN = 0,5$  м;  $l = 0,68$  м;  $d = 0,3$  м;  $z = 0,5$  м).



муле (90)  $\mathcal{E}_{\text{ВП}} = 4\pi\tau = 44$  мВ, откуда  $\lambda = \mathcal{E}_{\text{ВП}}/E_0 = 44 : 11,2 = 3,9$  см — это значение не противоречит данным лабораторных исследований э. д. с. ВП железа.

**Критерии подобия полей ВП объемно поляризованных тел**

Аномалии ВП одинаковы в модели и в натуре, если сохраняется нормированное значение аномальной кажущейся поляризуемости

$$\vartheta = \eta_{\text{ан}}/\eta_{\text{изб}} = \text{const}. \quad (275)$$

Для этого надо выполнить следующие условия:

- 1) сохранить геометрическое подобие форм тел, их размеров и положения токовых и измерительных электродов;
- 2) выдержать соотношение удельных сопротивлений тела и вмещающей среды;
- 3) учесть подобие временных характеристик тел, которое для случая, когда избыточная поляризуемость обусловлена сфероидальными включениями электронных проводников, выражается формулой

$$\frac{1 - F_\beta}{F_\beta} \cdot \frac{1 + C}{C} = \frac{1 - F(T)}{F(T)} = \text{const}, \quad (276)$$

где  $F_\beta$  — переходная характеристика ВП отдельных включений и избыточной поляризуемости тела в целом;  $C$  — поляризационный коэффициент формы включений, описанный ранее;  $F(T)$  — переходная характеристика ВП отдельного включения того же состава, если оно служит электродом и э. д. с. ВП измеряется на его контакте с заданной вмещающей средой. Виды переходных характеристик ВП описаны ранее.

Надо обратить внимание, что  $F(T)$  — кривая роста ВП после включения постоянного тока;  $1 - F(T)$  — кривая спада ВП после долгой зарядки. Их отношение постоянно и может быть вычислено с помощью табл. 18, 19. Связь избыточной поляризуемости с концентрацией включений, их формой, ориентировкой и размером исследована ранее.

Поляризуемость представляет собой приведенный к единице приложенного поля дипольный момент единицы объема. Принимается, что как в полевых, так и в лабораторных условиях исследуемые объемы пород значительно превышают размеры поляри-

зуемых частиц, заполняющих породу, так что измеряемая поляризуемость не зависит от размера исследуемого объекта. Напряженность поляризующего поля должна быть достаточно мала, чтобы параметры  $\lambda$  и  $\eta$  не зависели от напряженности поля.

При строгих расчетах надо иметь в виду, что аномальная кажущаяся поляризуемость  $\eta_{ан}$  зависит не только от избыточной поляризуемости тела  $\eta_{изб}$ , но и от поляризуемости вмещающей среды. Пренебрежение ролью последней дает погрешность, определяемую различием формул (149) и (152). Чаше всего эта погрешность для практических целей не существенна. Следовательно, результаты модельных исследований, полученные даже в водном баке, где  $\eta_1 = 0$ , могут быть распространены на случай относительно высокой поляризуемости вмещающей среды. Этот принцип справедлив для тел любой формы.

Критерии подобия для объемной и поверхностной ВП различны. Отыскание металлическим моделям аналогов среди тел вкрапленных руд требует сложного учета многих факторов.

#### Лабораторная установка

О. М. Шаповалов, с которым сотрудничает автор [141], для модельных работ использовал бак с размерами  $2,5 \times 2 \times 2$  м. Вмещающей средой служил песок, насыщенный пресной водой. Уровень воды

поддерживался постоянным на глубине 25 см от поверхности песка, благодаря этому достигалась стабильность удельного сопротивления и поляризуемости песка.

Измерения проведены над моделью, имевшей форму параллелепипеда со сторонами  $25 \times 10 \times 4$  см, изготовленной с помощью обтянутого материей деревянного каркаса, который заполнили однородной смесью графитового порошка и песка. Выбор графита в качестве электропроводящего вещества обусловлен его устойчивостью к процессам окисления. Попытки использования в модели мелкозернистого пирита оказались неудачными из-за уменьшения поляризации модели со временем. Поляризуемость графитовой модели немного возрастала в первые 1—2 недели, но в дальнейшем в течение всего периода исследований (4—5 месяцев) была постоянной.

Поляризуемость модели регулярно проверяли на установке, предназначенной для образцов пород (рис. 25). Одновременно оценивали удельное сопротивление модели. Режим измерений был такой же, как и при полевых работах:  $t_3 = 2$  мин,  $t = 0,5$  с; поляризуемость модели составляла в среднем 54%. Удельное сопротивление ее было порядка единиц ом-метров.

Токовыми электродами служили медные штырьки диаметром 10 мм, измерительными — стеклянные трубочки диаметром 4 мм, закрытые снизу деревянными пробками, играющими роль полупроницаемых перегородок. Трубочки заполняли насыщенным раствором медного купороса, в который вставляли медные проволоочки, подключаемые к измерительной аппаратуре. Для повышения стабильности электродного потенциала верхняя часть проволоочки, находящаяся в зоне переменного уровня купороса, была покрыта изоляционным лаком.

Источниками поляризующего тока были батареи сухих элементов с напряжением 40—80 В; ток в токовой линии составлял 30—50 мА. Измерения выполнены с таким же прибором, который применяли при полевых работах.

Примерно такой же бак использовали А. Н. Балашев и другие исследователи [19, 20]. Модель изготавливали из смеси графитового порошка с цементом, она имела размеры  $25 \times 10 \times 4$  см и примерно ту же поляризуемость, что в опытах О. М. Шаповалова. В опытах В. А. Белаша [25] над песком был слой воды, который играл роль «наносов». М. В. Семенов и др. [263, 265] использовали специальную установку с электропроводной бумагой.

#### Результаты опытов

О. М. Шаповалов [304] детально изучил зависимость аномалии ВП от положения токовых электродов относительно модели. Использована главным образом градиент-установка с неподвижными токовыми электродами, расстояние между которыми 100 см. Разнос измерительных электродов составлял 5 см; шаг их перемещений 5 см в нормальном поле и 2,5 см в аномальном.

При наблюдениях в баке без модели кажущаяся поляризуемость была постоянной на протяжении всего профиля и равнялась 0,5%. Это значение  $\eta_1$  в дальнейшем принималось за фоновое. В тех же условиях кажущееся удельное сопротивление уменьшалось от 55 Ом·м в центре АВ до 40 Ом·м вблизи токовых электродов (рис. 79, а). Значения  $\rho_k = \rho_1$ , полученные на каждой точке профиля при заданном положении токовых электродов без модели, приняты за фоновые.

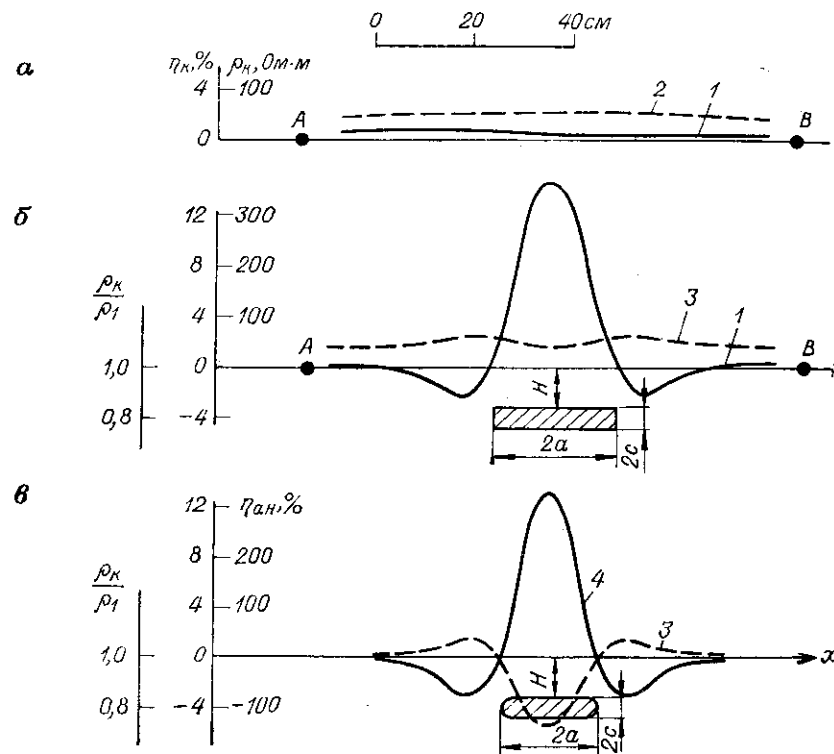


Рис. 79. Экспериментальные и теоретические графики  $\eta_k$  и  $\rho_k$  (по О. М. Шаповалову).

а — нормальный фон в баке (измерения без модели рудного тела); б — графики  $\eta_k$  (1) и  $\rho_k$  (2) над моделью, изготовленной из смеси графитового порошка с кварцевым песком; в — теоретические графики  $\eta_{ан}$  (3) и  $\rho_k/\rho_1$  (4) над эллипсоидальным телом, помещенным в однородное поляризующее поле.

Пример графиков  $\eta_k$  и  $\rho_k$  над моделью дан на рис. 79, б, в. Там же показаны теоретические графики  $\eta_{ан}$  и  $\rho_k$ , вычисленные для сжатого сфероида при  $a/c = 5$ , глубине верхней кромки  $H = 4c$ ;  $\rho_2/\rho_1 = 0,1$ ;  $\eta_{ан} = 60\%$ . Графики сходны между собой, но амплитуда и ширина экспериментальной аномалии ВП больше, что объясняется большей горизонтальной протяженностью модели по сравнению со сфероидом.

Н. П. Пишпарева [280] по формулам (264), (265) вычислила теоретические графики  $\eta_{ан}$  для параллелепипеда и удачно сопоставила их с экспериментальными графиками при разной ориентировке и глубине модели. Результаты моделирования подтвердили теоретический вывод о возрастании аномалии ВП при ориентировке поляризующего поля и линии наблюдений вдоль простиранья хорошо проводящего тела [141].

Ширина аномалии ВП определяется в основном протяженностью тела вдоль профиля. В пределах глубины тела, в которых аномалия ВП практически надежна, точки перегиба графика  $\eta_{ан}$  остаются приуроченными к вертикальным границам модели (рис. 80). Изменения формы графиков  $\eta_{ан}$  над моделью в зависимости от ее глубины, аналогичны полученным в результате теоретических расчетов (рис. 61).

Отмеченные черты графиков  $\eta_{ан}$  срединного градиента соответствуют профилям, проходящим над центром модели перпендикулярно к ее границам. На параллельных профилях, проходящих рядом с проекцией модели на плоскость измерений, аномалия ВП затухает постепенно. Горизонтальное расстояние профиля от поляризованного тела играет в принципе ту же роль, что и глубина тела. Площадь аномалии ВП на сети параллельных профилей превышает площадь проекции тела за счет большей протяженности аномалии в направлении, перпендикулярном к приложенному полю (рис. 81).

Изменения формы графиков  $\eta_k$  в зависимости от положения модели относительно токовых электродов показаны на рис. 82. На оси абсцисс за единицу расстояния принята глубина центра модели. Экспериментальные графики сходны с теоретическими для шарообразного тела (рис. 50). Если модель находится недалеко от токового электрода А и роль электрода В невелика, то максимальное значение  $\eta_k$  наблюдается в точке, удаленной от электрода А на то же расстояние, что и центр модели. Интенсивность максимума при расположении токового электрода над моделью составляет примерно 0,6 его значения, соответствующего расположению модели посередине между токовыми электродами. Для вертикальной модели, расположенной за пределами АВ, интенсивность аномалии  $\eta_k$  в 1,15 раза больше, чем для модели, находящейся в середине АВ (рис. 82, а).

Для горизонтальной модели относительные изменения аномалии ВП еще больше: от 0,3 для положения модели под токовым электродом до 1,0 внутри АВ и до 1,1 — вне АВ (рис. 82, б).

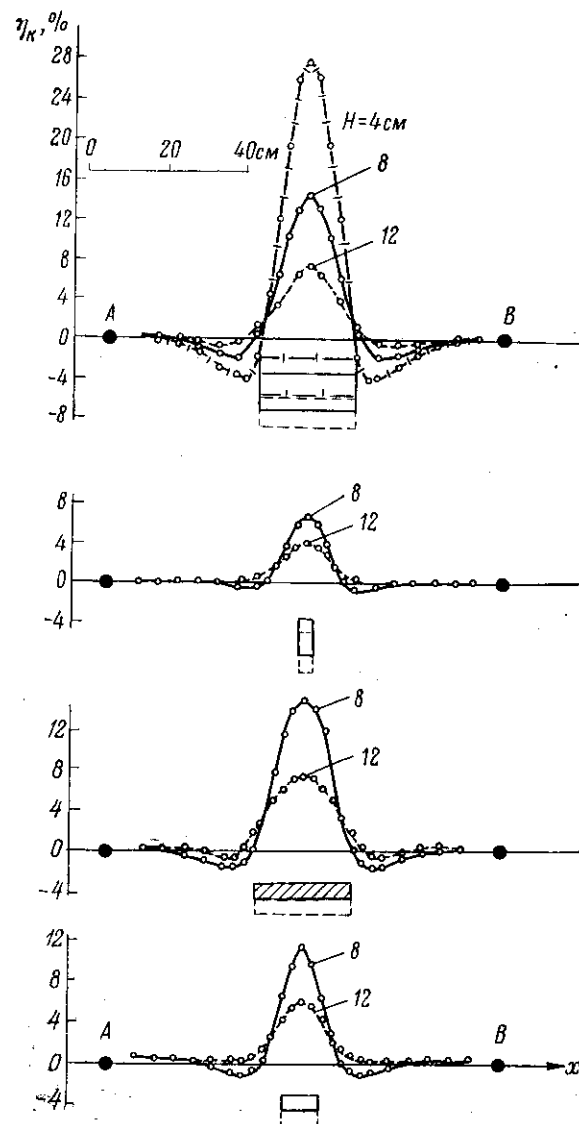


Рис. 80. Экспериментальные графики  $\eta_k$  над моделью при разной глубине залегания ее верхней кромки и разной ориентировке линии наблюдений (по О. М. Шаповалову).

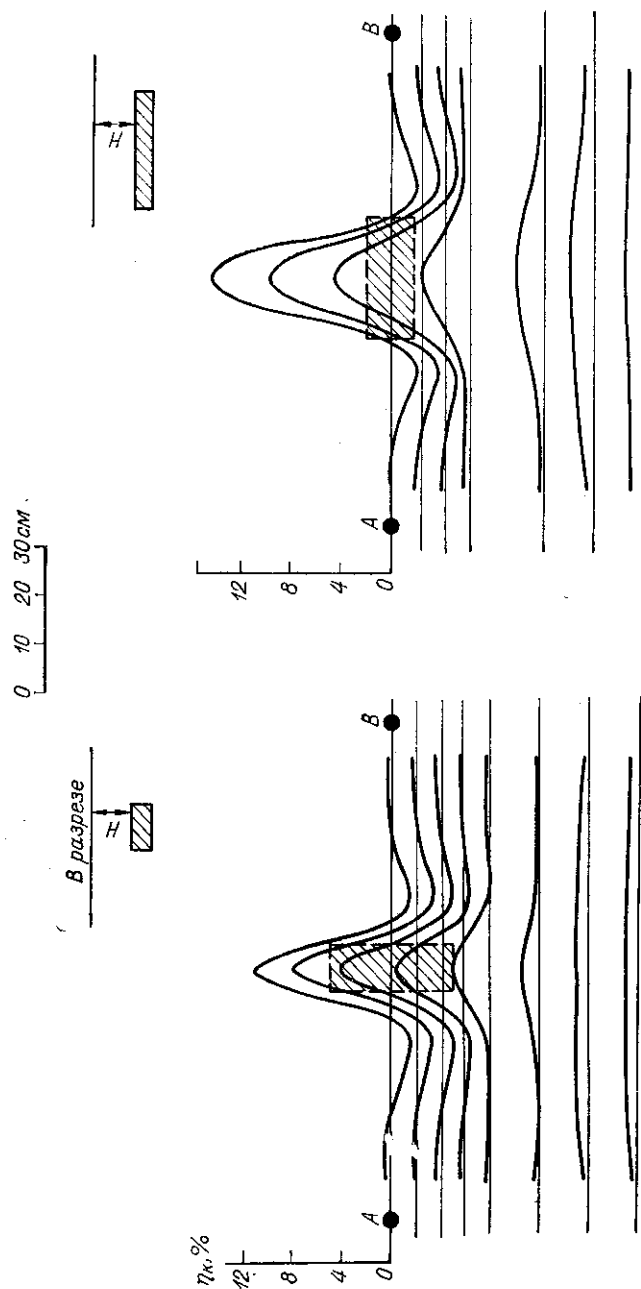


Рис. 81. План графиков  $\eta_k$  над моделью по профилям, заданным по простирацию и вкrest простираия модели (по О. М. Шаповалову).

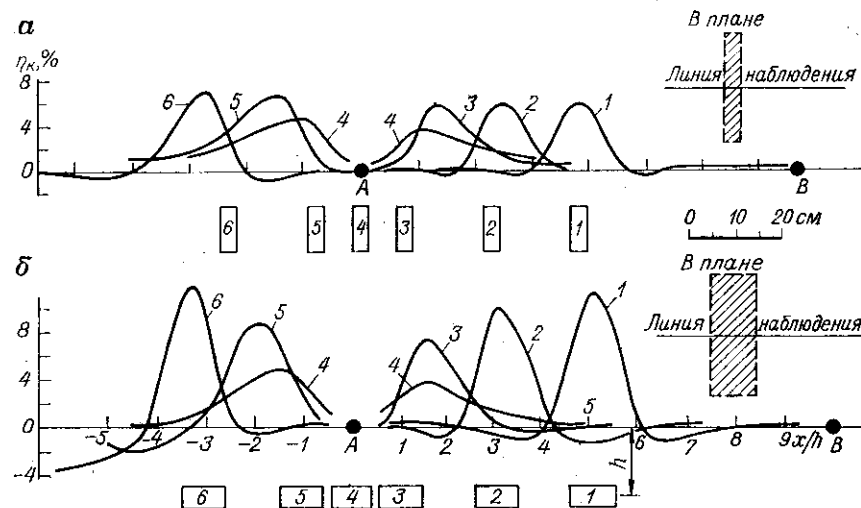


Рис. 82. Экспериментальные графики  $\eta_k$  при разном положении токовых электродов относительно модели, ориентированной поперек линии наблюдений (а) и вдоль нее (б) (по О. М. Шаповалову).

Поляризуемость модели, изготовленной из смеси графитового порошка и влажного песка, равна 54% (при  $t_g = 120$  с,  $t = 0,5$  с), удельное сопротивление в 10 раз меньше, чем у вмещающей среды — песка с поляризуемостью 0,5%.

Приведем пример, характеризующий один из скважинных вариантов метода ВП (рис. 83). Когда источник тока А, расположенный на глубине, превышающей глубину нижней грани модели, находился сбоку от модели, так что поляризующее поле было близко к горизонтальному, аномалия  $\eta_k$  над моделью положительна. Когда источник тока поместили под моделью, аномалия  $\eta_k$  стала отрицательной. Эта особенность аномалий ВП играет большую роль при истолковании результатов скважинных работ. Аномалия положительна, если источник тока и точки наблюдения находятся по одну и ту же сторону от поляризованного тела, и аномалия отрицательна, если тело находится между источником тока и линией наблюдения [19, 304].

Результаты опытов сыграли важнейшую роль в обосновании метода НВП. Из теоретических расчетов следует, что в случае применения переменного тока различие анодной и катодной поляризации должно привести к появлению постоянной составляющей тока, т. е. к эффекту фарадеевского выпрямления тока (ВТ), и образованию вокруг поляризуемого тела квадрупольной структуры поля ВТ.

Экспериментально подтвердил этот эффект в 1966 г. А. А. Смирнов [270, 271]. Схемы лабораторных установок показаны на рис. 84. Бак размером  $20 \times 40 \times 80$  см заполнен влажным кварцевым песком. Токовыми электродами А и В, через которые про-

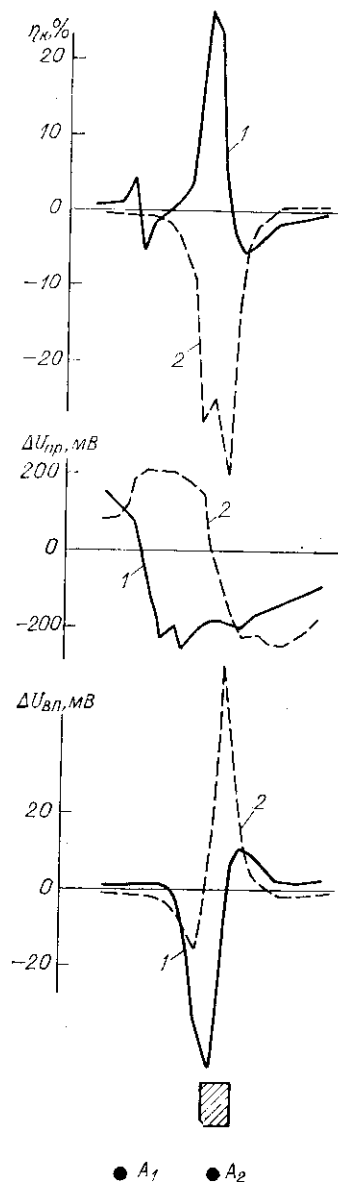


Рис. 83. Экспериментальные графики  $\Delta U_{ВП}$ ,  $\Delta U_{пр}$  и  $\eta_k$  при разном положении источника тока относительно модели и линии наблюдений, имитирующей вертикальную скважину (по О. М. Шаповалову).

пускали переменный ток частоты от 20 до 800 Гц, служили графитовые стержни длиной 10 см, диаметром 1 см.

В первой установке образец располагали в 5 см от электрода А. Измерительными электродами служили сам образец и каломельный электрод, находившийся у стенки бака в 20 см от образца по перпендикуляру к токовой линии. Для подсоединения образца к входной цепи измерительного прибора к образцу приклеивали медную пластинку с помощью стерокрила, который одновременно служил изолятором контакта. Образцам минералов придавали форму параллелепипеда размером 2—3 см [в длину и ширину, 3—4 см в высоту. Плотность возбуждающего тока вычисляли по формуле  $J = I / (2\pi d^2)$ , где  $I$  — сила переменного тока;  $d$  — расстояние от электрода А до центра образца.

Измерительным прибором служил милливольтметр постоянного тока, на входе которого имелся фильтр переменного тока. Первый отсчет  $U_{ВП}$  брали после включения переменного тока через интервал времени, в 5—6 раз превышающий постоянную времени фильтра.

На рис. 85 показана зависимость  $U_{ВТ}$  на образцах разных минералов от плотности тока на частоте 20 Гц. Знак ВТ соответствует знаку потенциала образца относительно электрода N. У образца графита 4 знак ВТ положительный, у образцов галенита 1 и халькопирита 2 — отрицательный. Потенциал ВТ у пирита 3 оказался относительно небольшим и меняющим знак с положительного на отрицательный по мере возрастания плотности возбуждающего тока.

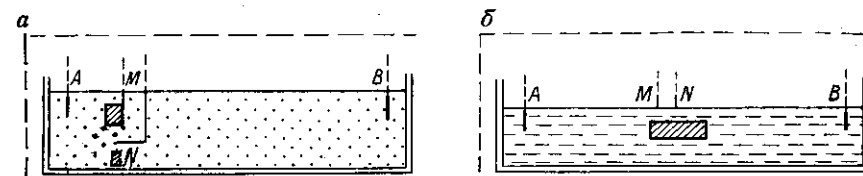


Рис. 84. Схемы лабораторных установок для изучения фарадеевского выпрямления переменного тока электропроводящими минералами.

а — четырехэлектродная установка для измерения потенциала образца; б — четырехэлектродная градиент-установка для измерения поля ВП над образцами минералов.

Во второй установке образец помещали посредине между А и В. Разнос  $AB = 19$  см, разнос измерительных каломельных электродов 1 см. В измерительной линии с помощью двух приборов измеряли напряжение постоянного (ВТ) и возбуждающего переменного тока. Параметром  $\alpha$  служило отношение этих напряжений, выраженное в процентах.

На рис. 86 показаны графики  $\alpha$  над галенитовой моделью при разной силе тока на частоте 20 Гц. При указанном на рис. 86 положении измерительных электродов (N слева, M справа) максимум  $\alpha$  над левой частью модели и минимум  $\alpha$  над правой частью означают, что выпрямленный ток течет к центру модели.

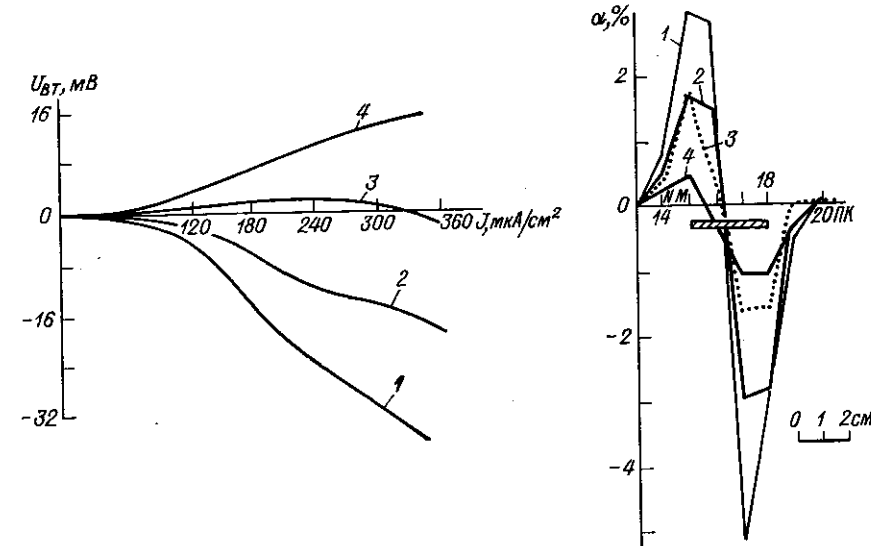


Рис. 85. Графики зависимости  $U_{ВТ}$  от плотности тока на образцах минералов. 1 — галенит; 2 — халькопирит; 3 — пирит; 4 — графит.

Рис. 86. Графики  $\alpha$  над образцом галенита. Сила тока, мА: 1 — 15, 2 — 10, 3 — 5, 4 — 2.

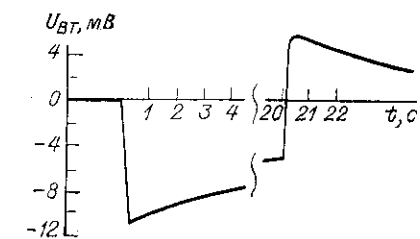


Рис. 87. Осциллограмма  $U_{BT}$  во время и после выключения тока над образцом галенита. Время зарядки 20 с.

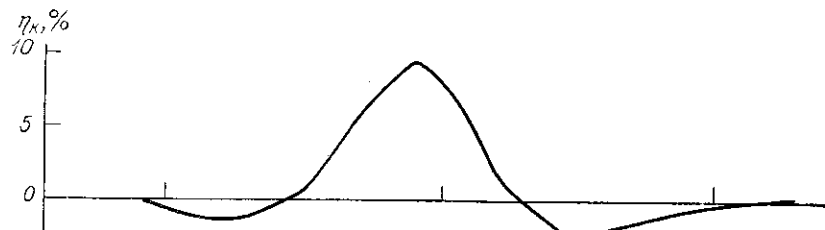
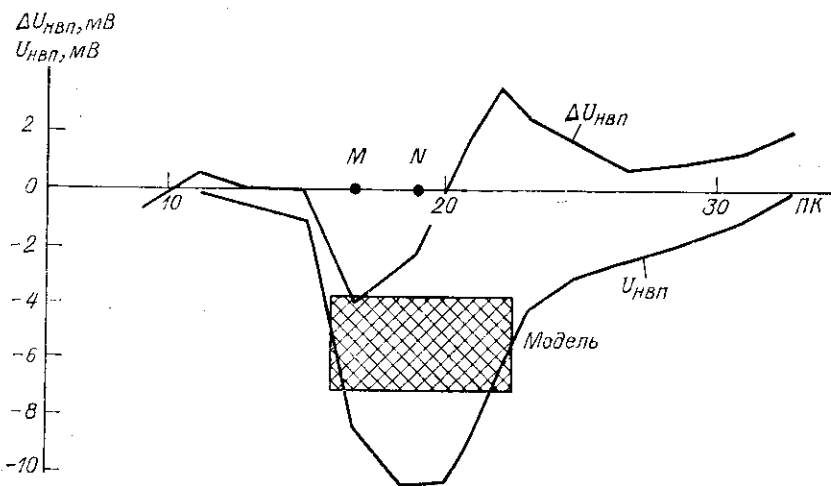


Рис. 88. Результаты измерений поля  $\eta_k$  и НВП с установкой градиента над образцом галенита.



В опытах с графитовой моделью направление выпрямленного тока было противоположным. Повышение частоты у всех образцов вызывало уменьшение ВТ, обратно пропорциональное частоте. Повышение частоты с 20 до 800 Гц привело к уменьшению параметра  $\alpha$  над галенитовой и графитовой моделями в 20—40 раз.

Появление выпрямленной составляющей тока приводит к вторичной поляризации поверхности электронного проводника. Встречный ток ВП уменьшает выпрямленный ток, вследствие чего по мере пропускания переменного тока наблюдается спад поля ВТ, а после выключения переменного тока остаточный встречный ток создает поле ВП противоположного знака (рис. 87).

Как видно на рис. 85, потенциал ВТ существенного значения достигает при плотности тока на образце свыше  $100 \text{ мкА/см}^2$ ,

которую в полевых условиях можно достичь лишь при использовании горных выработок и размещения источника тока вблизи рудного тела. Применительно к наземным поисковым съемкам нелинейную составляющую ВП искали при малой плотности возбуждающего тока и замене переменного тока на импульсы постоянного тока одного и другого знака.

Использовали лабораторную установку, схема которой показана на рис. 84, б. С градиент-установкой  $MN = 2 \text{ см}$  по профилю над моделью измеряли  $\Delta U_{пр}$  и  $\Delta U_{ВП}$ . Затем при том же режиме тока измеряли потенциал НВП. Для этого электрод  $M$  перемещали по профилю, а электрод  $N$  вдоль стенки бака так, что линия  $MN$  была примерно перпендикулярна к профилю, а значение  $\Delta U_{пр}$  по возможности минимальным.

Использовали импульсы тока длительностью 10 с. Принимали за НВП алгебраическую сумму напряжений ВП, наблюдаемых через 0,5 с после выключения тока при одном и другом его направлении.

Пример результатов измерений над образцом галенита показан на рис. 88. Образец размером  $6 \times 5 \times 3 \text{ см}$  находился посередине токовой линии ( $AB = 40 \text{ см}$ ; сила тока 15 мА) на глубине 3,5 см от поверхности песка. При измерениях с градиент-установкой  $\eta_k$  над образцом достигала 10,5%;  $\Delta U_{ВП} = 23 \text{ мВ}$ . Потенциал НВП имел отрицательный знак и доходил до 10 мВ. По форме график  $U_{НВП}$  сходен с графиком  $\Delta U_{НВП}$ . Параметр  $\gamma$ , введенный формулой (183), составлял 1 см. Над образцом халькопирита знак НВП был также отрицательным, а значение  $\gamma$  примерно вдвое меньше, чем над галенитом. Над графитом установлен положительный знак потенциала НВП. А. А. Смирнов [270, 271] изучил также временные зависимости НВП галенита, халькопирита, пирита, графита и установил их существенные различия, дающие перспективу дифференциации этих минералов на основе изучения НВП.

## ВЫВОДЫ

1. Критерии подобия существенно различны для поверхностно поляризуемых электропроводящих тел и объемно поляризуемых горных пород и вмещающих руд. В первом случае важную роль играют абсолютные значения коэффициента поверхностной поляризации  $\lambda$  и размера тела, а также форма тела. Во втором случае критерии подобия проще и практически сводятся к сохранению электрических свойств и геометрическому подобию модели рудному телу. В полевых условиях приходится иметь дело преимущественно с объемной поляризацией, поэтому следует предпочитать использование объемно поляризуемых моделей, изготовленных из порошка, устойчивого к окислению электронного проводника (графит, магнетит и др.).

2. Исследование полей ВП над моделями находится в хорошем согласии с результатами соответствующих теоретических расчетов. Моделирование наземных и скважинных вариантов ВП дало ценные сведения об особенностях полей ВП различных тел, в частности, о закономерностях зависимости знака аномальной кажущейся поляризуемости от взаимного положения источника тока, поляризуемого тела и линии наблюдений.

3. Модельные исследования подтвердили существование заметных нелинейных эффектов ВП, включая фарадеевское выпрямление тока, и квадрупольную структуру поля НВП.



## МЕТОДИКА И ТЕХНИКА ПОЛЕВЫХ РАБОТ

В отношении методики и техники полевых работ метод ВП наиболее близок к методу сопротивлений, также имеющему разновидности на постоянном и низкочастотном переменном токе [42]. Главное различие между ними в том, что при использовании постоянного тока в методе ВП кроме напряжения между измерительными электродами и силы тока в линии АВ во время пропускания тока через землю измеряют напряжение ВП после выключения тока. При использовании переменного тока в методе ВП измеряют приращение напряжения, соответствующее переходу от более высокой к более низкой частоте, или сдвиг фазы напряжения относительно тока в линии АВ.

В Советском Союзе наибольшее распространение получила аппаратура для работ на импульсах постоянного тока. Вместе с тем серийно выпускается аппаратура ИНФАЗ-ВП и ВП-Ф для фазовых измерений [286] и готовится к выпуску аппаратура для амплитудных измерений на переменном токе. За рубежом применяются те же варианты метода ВП. Среди ведущих канадских и американских фирм, например, «Синтрекс», «Ньюмонт» и «Хантек» отдают предпочтение импульсному току, «Мак-Фар» и «Феникс» — переменному току.

В дальнейшем будет идти речь преимущественно о способе постоянного тока. Однако большинство исследуемых методических и технических вопросов, исключая конкретное устройство аппаратуры, в равной мере относится ко всем разновидностям метода ВП.

### ОСНОВНЫЕ ТРЕБОВАНИЯ К АППАРАТУРЕ

Необходимость измерения еще одной величины — разности потенциалов поля ВП — налагает дополнительные требования к аппаратуре по сравнению с методом сопротивлений. Они опре-

деляются прежде всего нестационарностью и относительно небольшим значением поля ВП, а также большим временем его установления у рудных тел. Существенные помехи для измерения полей ВП в земле создают нестационарные разности потенциалов между измерительными электродами, порождаемые:

- а) самопроизвольным изменением электродных потенциалов,
- б) ВП электродов под действием протекающего через них электрического тока,
- в) «блуждающими» промышленными токами и меняющимися со временем естественными электрическими полями в земле.

Первые две причины связаны с применяемой аппаратурой, борьба с этими помехами ведется путем соответствующего выбора конструкции электродов, а также параметров генераторной и измерительной аппаратуры. Третья причина непосредственно связана с особенностями изучаемой среды. Для борьбы с такими помехами приходится прибегать в основном к методическим средствам: выбору значения и направления разностей электродов, режима тока в линии АВ, удобного времени и т. д. Полностью избавиться от всех помех не удастся, и требования к аппаратуре в значительной мере определяются уровнем неустраняемых помех.

#### Измерительные электроды

Требования к электродам наиболее высоки в методе естественного электрического поля, и многие сведения, полученные в ходе разработки электродов для метода естественного поля, имеют прямое отношение к методу ВП. Наибольшая стабильность электродных потенциалов достигается, когда металл электродов не контактирует непосредственно с землей, а погружен в раствор собственных ионов, причем для обеспечения контакта с землей раствор помещается в пористый сосуд, проницаемый для электрического тока.

Удачная конструкция такого медного электрода была предложена А. С. Семеновым еще в 1937 г. Фактически все полевые работы (за исключением зимних) по методу ВП на импульсном токе проводятся в СССР с такими электродами \*. А. С. Семенов [255] подробно описал свойства электродов и правила обращения с ними. Эти правила сохранены в инструкции по методу ВП [107]. Однако даже при строгом соблюдении всех предосторожностей электродные потенциалы могут изменяться на 0,1—0,3 мВ за несколько десятков секунд, затрачиваемых на измерение поля ВП на одной точке. Основные причины изменений электродных потенциалов сводятся к различиям концентрации раствора медного купороса в сосудах и температуры электродов [255]. Разница концентрации 10—20% порождает разность потенциалов до 1 мВ, причем электрод, погруженный в более концентрированный

\* Получившие широкое распространение электроды конструкции А. С. Полякова отличаются лишь формой деталей.

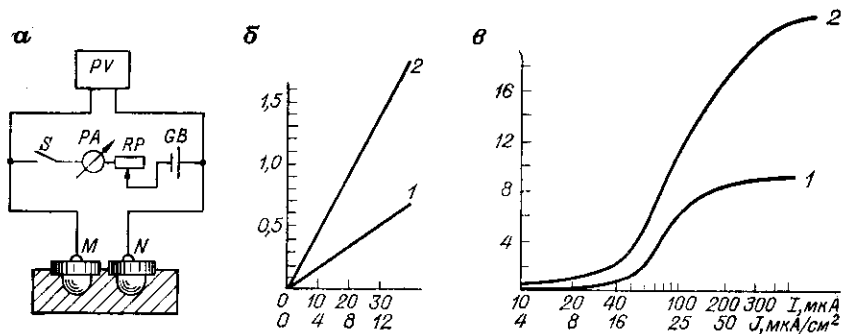


Рис. 89. Схема установки (а) и полученные зависимости э. д. с. ВП медных «неполяризующихся» электродов от силы тока (б) и от логарифма силы тока (в). Электроды находятся в вате, смоченной: 1 — пресной водой, 2 — концентрированным раствором медного купороса; PV — измерительный прибор; PA — микроамперметр.

раствор, имеет положительный потенциал. Повышение температуры электрода на  $1^\circ\text{C}$  приводит к повышению потенциала электрода на 0,7—1,0 мВ, причем в разбавленных растворах изменения потенциала относительно меньше.

На практике, как отмечает А. С. Семенов, температура электродов может отличаться от температуры почвы на  $5\text{--}10^\circ\text{C}$ . Скорость изменения потенциала электрода зависит от его размеров, определяющих тепловую инерцию, поэтому электроды делают достаточно массивными. Разность потенциалов между электродами будет наименьшей, если оба электрода находятся при одинаковой температуре в растворе одного состава и концентрации. Это достигается за счет заливки в сосуды одного и того же раствора и такого расположения электродов на профиле, при котором температура почвы и электродов, по возможности, одна и та же.

ВП возникает под действием электрического тока на любом контакте металла и электролита, в том числе и на измерительном электроде. Снизить ее можно, если подобрать подходящий состав металла электрода и раствора и максимально уменьшить плотность тока, текущего через электрод. Медь в медном купоросе подвергается гораздо меньшей ВП, чем в грунтовой воде. Это служит основанием применения медных «неполяризующихся» электродов. Вместе с тем следует отметить, что приемлемыми могут быть и другие электроды, например свинцовые, покрытые слоем хлористого свинца и помещенные в раствор хлористого калия [179].

А. А. Смирнов исследовал ВП медных «неполяризующихся» электродов. Схема установки показана на рис. 89, а. Два одинаковых электрода М, N, заполненных концентрированным раствором медного купороса, помещали в сосуд с ватой, пропитанной тем или иным раствором. При замыкании тумблера S через электроды протекал постоянный ток от батареи химических элементов GB.

Силу тока можно было регулировать потенциометром RP и измерять с помощью микроамперметра PA. Прибором PV измеряли разность потенциалов между электродами во время протекания тока и после его выключения. Силу тока в эксперименте изменяли от 6 до 500 мкА. Отсчет  $\Delta U_{\text{ВП}}$  снимали через 0,5 с после 30-секундной зарядки. Токковые зависимости ВП приведены на рис. 89, б. При малом токе — до 40 мкА, соответствующем плотности тока на медном стерженьке  $16 \text{ мкА/см}^2$ , — э. д. с. возрастала прямо пропорционально току. Коэффициент пропорциональности  $A = 0,016 \text{ мВ/мкА}$ , когда вата была смочена пресной водой, и возрос до  $0,048 \text{ мВ/мкА}$ , когда вату смочили концентрированным раствором медного купороса. Причиной возрастания э. д. с. ВП помимо смены электролита было окисление стерженьков и загрязнение электролита внутри сосуда, произошедшее за время предыдущего опыта.

При увеличении тока до 100 мкА и более э. д. с. ВП в обоих опытах сначала резко возрастала, затем приближалась к асимптотическому значению, равному в первом опыте 9 мВ, во втором — 22 мВ (рис. 89, в).

Полученные данные показывают, что ВП может достигать десятых долей милливольт, как только ток в измерительной линии составит несколько микроампер. Чтобы помехи, создаваемые ВП измерительных электродов, не превышали 0,1 мВ, ток в измерительной линии должен быть менее 1 мкА.

При работах на переменном токе можно в измерительной линии использовать медные или латунные шпильки взамен неполяризующихся электродов [286]. Дело в том, что применяемая частота тока (0,3 Гц и выше) примерно на порядок выше собственной частоты э. д. с. ВП шпилек, поэтому их влияние не столь велико, как при использовании длительных импульсов постоянного тока. Однако с понижением частоты поляризующего тока, производимым по мере совершенствования аппаратуры, роль ВП шпилек как помехи будет возрастать и станет такой же проблемой, как при работах на постоянном токе.

Опыт зимних работ на льду озера на Кольском полуострове показал, что и при использовании постоянного тока неполяризующиеся электроды целесообразно заменить на простые медные стержни. Причины и условия стабильности электродных потенциалов при отрицательных температурах остались неизученными.

Указанный выше предельный ток в измерительной линии обеспечивается высоким входным сопротивлением прибора. Входное сопротивление должно составлять при токе до 1 мкА и напряжении между измерительными электродами  $1 \text{ В } R_{\text{вх}} \geq 1 \text{ МОм}$ . Если уровень неустраняемых помех при изучении полного значения ВП в большом диапазоне времени составляет 0,1 мВ, то высшая чувствительность измерительного прибора может быть ограничена 0,5—1 мВ на шкалу в 100 делений.

Использование коротких импульсов тока и небольших исследуемых интервалов времени, так же как и переменного тока, позволяет, с одной стороны, уменьшить помеху, создаваемую нестабильностью электродных потенциалов, с другой — за счет многократных отсчетов и фильтрации полезного сигнала резко повысить помехозащищенность измерений ВП. В этом случае удается реализовать чувствительность прибора 5 мкВ на шкалу, т. е. в 100 раз выше, чем при работах на постоянном токе.

Вопрос о времени отсчета напряжения ВП — сложный. В нем имеются три аспекта. Первый — технический. Значение напряжения ВП тем больше, чем ближе отсчет к моменту выключения тока. Но уменьшение времени задержки отсчета накладывает возрастающие требования к быстродействию измерительного устройства и точности определения времени отсчета.

Переходные процессы в усилителе постоянного тока, созданном для работ по методу сопротивлений и применяемом в первых видах серийной аппаратуры для метода ВП [109, 110], длятся 0,1—0,2 с. Соответственно надежные измерения напряжения ВП после одиночного импульса тока начинаются через 0,25—0,5 с. Недавно разработаны способы накопления и фильтрации полезного сигнала в режиме периодических импульсов тока, обеспечивающие измерение  $\Delta U_{ВП}$  через 1—5 мс [305] и даже через 0,1 мс [116].

На выбор момента отсчета напряжения ВП влияют и переходные процессы в источнике поляризующего тока. В 50-х годах, когда создавались первые электроразведочные станции, в том числе ВП-59, лучшими из доступных для массового производства выключателей сильного тока были электромеханические контакторы, время срабатывания которых, определяемое существованием искры между контактными пластинами, составляло 0,1—0,2 с. Поэтому в станции ВП-59 момент отсчета напряжения ВП выбран равным 0,5 с. Он был сохранен в станциях ВП-62, ВПС-63 и др.

В последние годы промышленность выпускает разнообразные и достаточно мощные полупроводниковые выключатели тока, обеспечивающие выключение тока быстрее чем за 100 мкс. Ограничения в выборе момента отсчета напряжения ВП, налагаемые источником поляризующего тока, теперь в значительной мере преодолены. Созданы генераторные устройства, позволяющие вести полевые измерения, начиная с 1 мс после выключения тока (станция СВП-74 мощностью 20 кВт) и даже с 0,1 мс (аппаратура РС ВП мощностью 30 Вт). Быстродействие, надежность и точность переключающих устройств обеспечили разнообразие режимов тока, осуществляемых с одним генератором поляризующего тока.

Второй аспект — физический. С уменьшением времени задержки отсчета возрастает роль связанных с выключением тока переходных электродинамических процессов в земле и затрудняется выявление ВП. Время установления электрического поля

в земле пропорционально электрической проводимости земли и квадрату расстояния между источником тока и точкой наблюдения [312, 313]. Если расстояние между электродами не превышает 1000 м, а удельное сопротивление пород порядка сотен ом-метров, то время затухания электродинамических процессов имеет порядок единиц миллисекунд. Если расстояние между электродами достигает нескольких километров, а удельное сопротивление составляет лишь единицы-десятки ом-метров (таковы условия работ на некоторых участках Русской платформы), то время затухания электродинамических процессов возрастает до единиц секунд. Правда, последние условия на практике встречаются редко, но при создании стандартных видов аппаратуры и методики полевых работ их также приходится иметь в виду.

Третий аспект — геологический. С уменьшением времени задержки отсчета все большую долю в общем процессе ВП занимает поляризация вмещающих пород и мелких аксессуарных включений рудных минералов. Одновременно ухудшается достоверность выявления массивных рудных тел.

Вопрос о времени отсчета напряжения ВП, в принципе, не может быть решен указанием на какой-либо один якобы наилучший вариант. Оптимальный отсчет зависит от условий работ: технических возможностей, проявления электродинамических эффектов, спектра электрических помех, а также от решаемых геологических задач и временных параметров ВП искомым тел. В общем случае предпочтение следовало бы отдать аппаратуре, позволяющей менять момент отсчета в широком диапазоне времени и приспосабливать его к месту и виду работ.

Требования к источнику тока можно вывести из предпосылки, что измеряемое значение  $\Delta U_{ВП}$  должно превышать уровень помех  $e$  не менее чем в 10 раз, чтобы относительная погрешность измерений  $\Delta U_{ВП}$  была не хуже 10%:  $\Delta U_{ВП} \geq 10e$ . Так как  $\Delta U_{ВП} = \eta_k \Delta U_{пр}$ ;  $I = K \Delta U_{пр} / \rho_k$  ( $K$  — коэффициент установки), то требуемая сила тока, выраженная в амперах, равна

$$I \geq 10eK / (\rho_k \eta_k), \quad (277)$$

где  $e$  — уровень помех, В;  $\rho_k$ , Ом·м;  $\eta_k$  — в безразмерных относительных единицах;  $K$ , м.

Для точек наблюдения, находящихся в центре линии АВ, когда  $MN \ll AB$  и все электроды находятся на поверхности земли на одной прямой,

$$K \approx (\pi/4)(AB^2/MN). \quad (278)$$

Уровень помех зависит от близости исследуемого участка к промышленным электрическим установкам: электрифицированным железным дорогам, рудникам с электровозной тягой на постоянном токе, а вдали от них определяется главным образом

нестабильностью собственных потенциалов измерительных электродов, составляющей примерно 0,1 мВ. Соответственно нижний уровень помех  $\epsilon = 10^{-4}$  В. При указанных значениях  $K$  и  $\epsilon$  требуемая сила тока

$$I \geq 10^{-3} \pi AB^2 / (4\rho_k \eta_k MN) \approx AB^2 / (1000 \rho_k \eta_k MN). \quad (279)$$

Из последней формулы следует, что в районах с большой мощностью хорошо проводящих наносов, когда для обнаружения рудных тел требуются значительные разности  $AB$ , необходим поляризующий ток большой силы. Например, при  $AB = 2000$  м;  $\rho_k = 200$  Ом·м;  $\eta_k = 0,02$ ;  $MN = 50$  м, необходим ток не менее 20 А. Для обеспечения такого тока при сопротивлении заземлений 20 Ом напряжение источника тока должно быть не менее 400 В, а мощность его не менее 8 кВт.

В районах с небольшими наносами, высоким удельным сопротивлением пород и относительно неглубоким залеганием рудных тел, когда можно ограничиться малыми разностями  $AB$ , требуемый ток невелик. Например, при  $AB = 200$  м,  $\rho_k = 2000$  Ом·м,  $\eta_k = 0,02$  и  $MN = 20$  м достаточно иметь ток 0,05 А. Соответственно при сопротивлении заземлений 1000 Ом напряжение источника тока должно быть не менее 50 В, а мощность всего лишь 2,5 Вт.

Таким образом, требуемые параметры источника поляризующего тока существенно зависят от геолого-геофизических условий полевых работ. Для полного удовлетворения производственных потребностей необходимо иметь определенный набор, или, как его называют, нормальный ряд генераторной аппаратуры, различающейся по мощности и соответственно по габаритным размерам и массе.

Требования к постоянству тока во время зарядки относительно просты, если  $\Delta U_{вп}$  измерять после выключения тока. Тогда 3—5-процентная погрешность в стабильности тока является приемлемой. Гораздо выше требования к стабильности тока и крутизне его фронтов при измерении эффектов ВП во время зарядки. Тогда изменение силы тока должно быть не более 0,1%. В настоящее время это надежно обеспечивается специально разработанными стабилизаторами тока.

Качество заземлений играет в методе ВП значительную роль, поскольку требуется обеспечение стабильности токов большой силы. В 1952 г. автор провел специальные опыты и убедился, что в степных условиях устойчивость силы тока в течение нескольких часов, требуемых на отработку профиля по схеме срединного градиента, достигается, если ток, стекающий с каждой стандартной железной шпильки (глубина погружения примерно 1 м), не превышает 0,1 А. При большей «нагрузке» шпилек, когда на них плотность тока более 1 мА/см<sup>2</sup>, ток в линии через несколько минут начинает прогрессивно падать

и в конце концов оказывается на порядок меньше первоначального тока. В таежных влажных условиях допустимый ток, приходящийся на каждую шпильку, достигает 0,5 А, т. е. больше, чем при сухой почве.

Причина резкого повышения сопротивления заземлений по мере пропускания через них тока кроется в процессах электрохимической поляризации поверхности шпилек и отложении на ней продуктов электролиза, а также в электроосмотическом высушивании приэлектродных зон. Содержащаяся в порах грунтов подвижная влага обычно заряжена положительно (диффузный слой ионов имеет положительный токовый электрод находится во влажном месте (его высушивание проявляется медленнее).

Поливка заземлений водой, особенно соленой, — эффективный способ снижения сопротивлений заземлений. Для удобства поливки целесообразно использовать трубчатые электроды [198], в стенках которых сделаны отверстия для протекания воды.

Применение больших токов обуславливает необходимость использования в токовой линии проводов с достаточно большим сечением медной проволоки, чтобы сопротивление проводов не превышало сопротивления заземлений и чтобы сами провода, не перегреваясь, выдерживали большой ток. В зависимости от силы тока, пригодными являются провода ГПМП, ГПСМП, ГПСМПО и им подобные.

В измерительной линии, учитывая высокое входное сопротивление измерительного прибора, допустимы провода с относительно высоким сопротивлением, но легкие и прочные. Для этой цели подходят телефонные провода ПВР и другие в хорошей хлорвиниловой изоляции.

## УСТРОЙСТВО АППАРАТУРЫ ДЛЯ РАБОТ НА ПОСТОЯННОМ ТОКЕ

В соответствии с разнообразием геоэлектрических условий и решаемых геологических задач выпускается несколько видов аппаратуры для метода ВП, различающихся мощностью источников поляризующего тока, режимом тока и измеряемыми параметрами. Первой была разработанная в 1959 г. ВИТР совместно с ВНИИ геофизикой станция ВП-59 [211]. Серийный выпуск станций осуществил Мытищинский приборостроительный завод (МПЗ).

Станция ВП-59 была предназначена для работы с одиночными длительными (не менее 30 с) импульсами постоянного тока. В 1962 г. она модернизирована конструкторским бюро МПЗ и приспособлена для работы в режиме 10-секундных разнополярных импульсов тока; эта станция получила шифр ВП-62.

Токовые электроды

Качество заземлений играет в методе ВП значительную роль, поскольку требуется обеспечение

стабильности токов большой силы. В 1952 г. автор провел специальные опыты и убедился, что в степных условиях устойчивость силы тока в течение нескольких часов, требуемых на отработку профиля по схеме срединного градиента, достигается, если ток, стекающий с каждой стандартной железной шпильки (глубина погружения примерно 1 м), не превышает 0,1 А. При большей «нагрузке» шпилек, когда на них плотность тока более 1 мА/см<sup>2</sup>, ток в линии через несколько минут начинает прогрессивно падать

В любой последующий момент времени после выключения тока  $\Delta U_{\text{вп}}$  можно измерить импульсным вольтметром с помощью кнопки, установленной на лицевой панели прибора. При нажатии кнопки цепь питания ЯЗ разрывается, при отпускании ее — подается питание и через 0,5 с реле К4 подключает емкость С. В итоге измеряется значение  $\Delta U_{\text{вп}}$  через 0,5 с после отпускания кнопки.

Для контроля за шкалами измерительного прибора используется градуировочное устройство ГУ. При его включении на вход автокомпенсатора подается напряжение, равное 0,8 номинала той или иной шкалы. Для питания устройства служит гальванический элемент компенсатора естественной поляризации.

Автокомпенсатор рассчитан на измерение напряжений до 300 мВ. Для расширения предела измеряемых значений  $\Delta U_{\text{пр}}$  на вход автокомпенсатора во время пропускания поляризующего тока может быть включен делитель, который уменьшает напряжение в 100 раз и расширяет диапазон измерений  $\Delta U_{\text{пр}}$  до 30 В. Сопротивление делителя равно нескольким мегаомам и не ухудшает входное сопротивление измерительного прибора.

Прибор питается от батарей гальванических элементов, комплект которых обеспечивает непрерывную работу прибора в течение не менее 48 ч.

В станции ВПС-63 вместо микроамперметра РА2 можно использовать осциллограф. Автопереключатель станции ВПП-67 исполняет роль показанной на рис. 91 линии связи S2--S1.

## СТАНЦИЯ СВП-74

### Назначение и технические характеристики \*

Станция вторичных полей СВП-74 предназначена для комплексного изучения вторичных электрических полей с заземленными токовой и измерительной

линиями. Она рассчитана на регистрацию переходных электрических процессов в земле в диапазоне времени от миллисекунды до десятков минут, а также на измерение модуля и мнимой составляющей напряжения на низкочастотном переменном токе в диапазоне от 2,44 до 19,5 Гц.

Станция позволяет определять:

- а) кажущуюся поляризуемость на импульсном токе;
- б) кажущееся удельное сопротивление на импульсном и переменном токе;
- в) сдвиг фазы напряжения в измерительной линии относительно тока в линии АВ;
- г) переходную характеристику вторичного поля, включающую области становления электрического поля и ВП;

\* Раздел написал Л. М. Иоффе.

д) дифференциальную кажущуюся поляризуемость в различных интервалах переходного процесса ВП;  
е) параметры нелинейных процессов ВП как на импульсах постоянного тока разного направления, так и при сочетании их с переменным током.

Станция СВП-74 (как и ВПС-63) укомплектована каротажной лебедкой и другим оборудованием, позволяющим вести не только наземные, но и скважинные исследования.

#### Основные технические характеристики

|                                                          |                         |
|----------------------------------------------------------|-------------------------|
| Мощность генераторной установки, кВт                     | 20                      |
| Диапазон рабочего напряжения, В                          | 100—460                 |
| Диапазон тока в нагрузке генераторной установки, А       | 0,8—43                  |
| Диапазон сопротивления нагрузки, Ом                      | 10—600                  |
| Стабильность среднего значения тока, %                   | 3                       |
| Малый тиристорный коммутатор (МТК):                      |                         |
| мощность, Вт                                             | 100                     |
| диапазон рабочего напряжения, В                          | 0—100                   |
| диапазон тока в нагрузке (10 фиксированных значений), А  | 0,03—1                  |
| максимальное сопротивление нагрузки, Ом                  | 1500                    |
| Автоматическая коммутация тока в нагрузке с параметрами: |                         |
| длительность импульсов, с                                | 0,051—10 <sup>3</sup>   |
| скважность импульсов                                     | 2 или 6                 |
| частота переменного тока, Гц                             | 0,0095—19,5             |
| Диапазон регистрируемого импульсного напряжения, мВ      | 0,3—3·10 <sup>4</sup>   |
| Интервал фиксированных моментов регистрации, мс          | 2—3·10 <sup>6</sup>     |
| Диапазон регистрируемого переменного напряжения, мВ      | 0,01—3·10 <sup>3</sup>  |
| Рабочие частоты измерительной аппаратуры, Гц             | 2,44; 4,88; 9,76 и 19,5 |

Станция смонтирована на двух автомобилях ЗИЛ-131. Каротажная лебедка содержит 500 м кабеля КТО-1. Намоточных устройствах имеются 1 км провода для токовой и 1 км для измерительной линий, а также запасные катушки для 2 км провода. Оборудование станции включает неполяризующиеся электроды для наземных и скважинных работ, железные шпильки для наземных заземлений и свинцовый груз, используемый в качестве скважинного токового электрода.

#### Структурная схема

Станция состоит из генераторной ГУ и приемной ПУ установок (рис. 92). Источником тока в ГУ служит генератор постоянного тока G с приводом от двигателя автомобиля Дв. Номинальные параметры генератора: напряжение 460 В, ток 45,5 А, мощность 21 кВт при вращении якоря со скоростью 1450 об./мин. Изменяя силу тока в обмотке возбуждения генератора и скорость вращения якоря, можно в широких пределах изменять напряжение и ток в нагрузке.

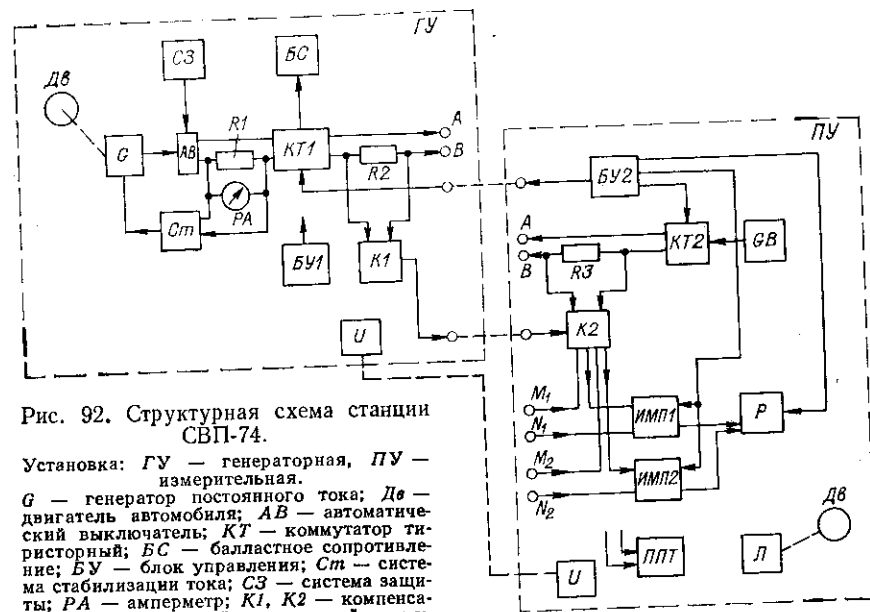


Рис. 92. Структурная схема станции СВП-74.

Установка: ГУ — генераторная, ПУ — измерительная.  
G — генератор постоянного тока; Дв — двигатель автомобиля; АВ — автоматический выключатель; КТ — коммутатор тиристорный; BC — балластное сопротивление; БУ — блок управления; СТ — система стабилизации тока; СЗ — система защиты; РА — амперметр; К1, К2 — компенсаторы; МТК — малый тиристорный коммутатор; ППТ — прибор переменного тока; ИП — импульсный прибор; P — регистратор; Л — лебедка.

Через автоматический выключатель АВ напряжение генератора поступает на мощный тиристорный коммутатор КТ1, который по заданной программе или по сигналу оператора включает и выключает ток требуемого напряжения в нагрузке — заземленной токовой линии. Предусмотрены следующие автоматические режимы коммутации тока:

- а) одиночные импульсы (ОИ) фиксированной длительности,
- б) однополярные периодические импульсы (ОПИ) со скважностью, равной 2,
- в) разнополярные периодические импульсы (РПИ) со скважностью, равной 2(РПИ-2) или 6(РПИ-6),
- г) переменный ток (ПТ) прямоугольной формы.

Возможно также ручное управление коммутацией тока.

Во время отключения токовой линии (от клемм А, В) коммутатор включает ток на балластное сопротивление BC, значение которого можно изменять в пределах от 10 до 400 Ом, устанавливая его близким к сопротивлению линии АВ. Постоянство нагрузки генератора при переключении тока с балласта на линию АВ и обратно стабилизирует его работу.

Сигналы управления на коммутатор поступают с блока управления (БУ), задающего тот или иной режим коммутации тока в нагрузке. Станция имеет два блока управления, один из которых размещен в генераторной (БУ1), второй в измерительной установке (БУ2). При совместной работе установок сигналы управ-

ления поступают из ПУ в ГУ по кабелю. Блок управления генераторной установки БУ1 используется при автономной работе ГУ.

Система стабилизации тока Ст автоматически поддерживает неизменным среднее значение первоначально установленной силы тока в нагрузке при изменении сопротивления нагрузки или числа оборотов двигателя.

Автоматический выключатель АВ совместно с системой защиты СЗ отключает генератор от остальных цепей ГУ, выключает двигатель автомобиля и подает соответствующий световой сигнал в аварийных ситуациях: при коротком замыкании нагрузки, перенапряжении, попадании напряжения на корпус автомобиля и др.

Амперметр РА измеряет силу тока в нагрузке генератора. Он имеет пределы измерений: 1; 3; 10; 30 и 100 А, которые устанавливаются изменением сопротивления шунта R1. Шунт амперметра одновременно является и элементом обратной связи Ст, так что при переключении предела стабилизации тока изменяется чувствительность амперметра. Сигналы принимаются с помощью неполяризующихся медных электродов, размещаемых в исследуемых точках земли  $M_1N_1$  и  $M_2N_2$ . При приеме с поверхности используются керамические электроды типа ЭН-1, в скважинах — специальные скважинные электроды.

Сигналы с электродов по проводам поступают на входную панель ПУ и далее на входы импульсных приборов (ИМП1 и ИМП2) или на вход прибора переменного тока (ППТ) в зависимости от принятого режима работы (импульсный или переменный ток). Каждая измерительная линия MN прокладывается в два провода. Еще два провода используют для телефонной связи.

В импульсном режиме исследований ранней стадии вторичного поля (от единиц до сотен миллисекунд) мгновенные значения напряжения в измерительной линии в фиксированные моменты времени определяют по показаниям стрелочных индикаторов импульсных приборов. При изучении поздних стадий вторичного поля (через десятые доли секунды и более) напряжение и линии MN можно записать регистратором Р — шлейфным осциллографом типа ЭПО-9. Импульсные приборы используют в этом случае в качестве предварительных усилителей.

Сигналы управления коммутационными элементами импульсных приборов поступают с блока управления БУ2 синхронно с коммутацией тока в линии АВ. Блок управления вырабатывает также сигналы меток времени, записываемые на фотоленту одновременно с записью напряжения в линии MN.

При работе в режиме переменного тока напряжение в измерительной линии определяют по показаниям стрелочного индикатора прибора переменного тока.

Компенсаторы К1 и К2 в ГУ и ПУ служат источниками напряжения для компенсации омической составляющей (активной компоненты) напряжения в измерительной линии, а также использу-

ются для определения силы переменного тока в линии АВ с помощью шунтов R2 и R3.

Батарейный тиристорный коммутатор КТ2, находящийся в измерительной установке, используется для получения тока в линии АВ при небольших разностях электродов и при коротаже скважин, когда достаточно напряжение до 100 В и ток до 1 А. Сигналы управления на КТ2 подаются с блока управления БУ2. Источником силового питания КТ2 служит батарея GB сухих элементов типа 29-ГРМЦ.

Источниками питания низковольтных цепей аппаратуры генераторной и измерительной установок, за исключением прибора переменного тока, служат аккумуляторы автомобилей и включенные параллельно им дополнительные аккумуляторы. Прибор переменного тока питается от встроенных батарей сухих элементов. Связь между операторами измерительной и генераторной установок и профилем осуществляется по телефону.

Основная аппаратура генераторной установки размещена в салоне автомобиля в двух стандартных стойках. Левая стойка имеет панель с органами управления и контроля силовой и низковольтной (аккумуляторной) цепей и два съемных блока — стабилизатор и блок управления. В правой стойке смонтированы элементы силовой цепи. Балластное сопротивление находится в отдельном шкафу салона.

Салон измерительной установки разделен перегородкой на два отделения. В первом на столе и в стандартной стойке размещена вся измерительная аппаратура: прибор переменного тока ППТ, два импульсных прибора ИМП1 и ИМП2, регистратор Р, блок управления БУ2, компенсатор К2, блок питания с субблоком батарейного тиристорного коммутатора КТ2 и панель с переключателем напряжения батарей.

Во втором лебедочном отделении размещены лебедка Л с кабелем типа КТО-1 длиной 500 м. Привод лебедки осуществляется от двигателя автомобиля Дв через коробку отбора мощности и двухскоростной редуктор. Здесь же установлены смоточное устройство с кабелями для соединения ПУ и ГУ, бензоэлектрический агрегат АБ-1-0/230, используемый для зарядки аккумуляторов и бытовых нужд, а также другое оборудование, необходимое для работ с использованием скважин.

Принципиальная схема коммутатора показана на рис. 93.

Коммутатор тока генераторной установки состоит из коммутаторов тока балласта КБ и источника поля КИП.

Коммутатор тока балласта КБ собран по схеме простого тиристорного ключа, поскольку служит только для включения и выключения тока без инвертирования его направления, нагрузка его чисто активная, а форма тока не имеет существенного значения. Для включения тока на балластное сопротивление БС

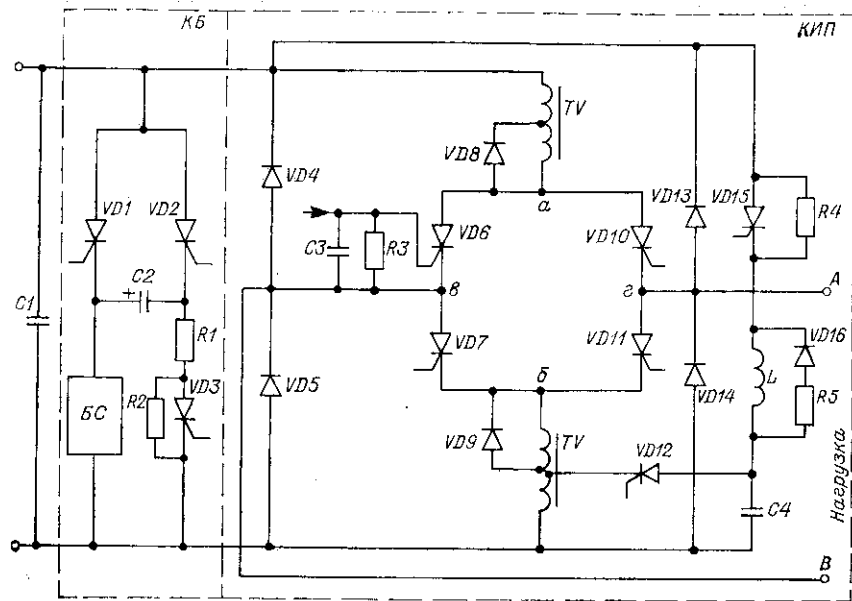


Рис. 93. Функциональная схема тиристорного коммутатора станции СВР-74. Коммутаторы: КБ — тока балласта, КИП — источника питания; VD — тиристоры.

сигналы управления подаются одновременно на управляющие электроды тиристоров  $VD1$  и  $VD3$ . При включении тиристора  $VD1$  ток протекает через балластное сопротивление. Одновременно через включенные тиристоры  $VD1$  и  $VD3$  и сопротивление  $R1$  конденсатор  $C2$  заряжается в полярности, показанной на рис. 93. Ток заряда конденсатора  $I_k$  уменьшается по экспоненциальному закону

$$I_k = I_0 e^{-t/(R_1 C)},$$

где  $I_0 = U_G/R_1$  — начальный ток;  $U_G$  — напряжение генератора;  $R_1$  — сопротивление нагрузки.

Когда конденсатор зарядится до напряжения генератора  $U_G$ , ток через тиристор  $VD3$  падает до нуля и тиристор выключается. Тиристор  $VD1$  остается включенным, так как через него протекает ток балластного сопротивления  $I_{BC}$ , превышающий ток удержания тиристора,  $I_{BC} = U_G/R_{BC}$ , где  $R_{BC}$  — балластное сопротивление.

Чтобы выключить тиристор  $VD1$ , управляющий сигнал подается на тиристор  $VD2$ . При включении  $VD2$  напряжение, имеющееся на конденсаторе  $C2$  к моменту коммутации, прикладывается к тиристорам  $VD1$  и  $VD2$  в полярности, обратной той, что показана на рис. 93. Ток, протекавший до этого через тиристор  $VD1$ , проходит по цепи  $VD2$ , перезаряжая конденсатор  $C2$ . Тиристор  $VD1$  обесточивается и выключается. Конденсатор  $C2$  перезаряжается

через открытый тиристор  $VD2$  в обратной полярности до напряжения  $U_G$ . Когда ток заряда конденсатора падает до нуля, тиристор  $VD2$  выключается. Указанные процессы повторяются при каждом цикле включения и выключения тока.

КИП собран по схеме мостового инвертора с двухступенчатой емкостной коммутацией. К одной из диагоналей моста (точки  $a$  и  $b$ ) приложено напряжение генератора, к другой (точки  $v$  и  $z$ ) подключена нагрузка — линия  $AB$ . Пока все тиристоры моста выключены, ток через нагрузку не протекает. Для включения тока в нагрузку сигналы управления подаются одновременно на два тиристора моста: либо  $VD6$  и  $VD11$ , тогда ток протекает в направлении от  $v$  к  $z$ , либо  $VD7$  и  $VD10$  и тогда направление тока обратное. В коммутаторе источника поля цепь гашения (выключения) тиристоров моста образована трансформатором  $TV$ , тиристором  $VD15$ , дросселем  $L$ , конденсатором  $C4$  и тиристором  $VD12$ .

Цепь гашения работает в следующем порядке. Одновременно с включением любой из пар тиристоров моста включается тиристор  $VD15$  и через дроссель  $L$  заряжается конденсатор  $C4$  до напряжения генератора  $U_G$ . Дроссель ограничивает силу тока, протекающего в цепи заряда конденсатора. После того как конденсатор полностью зарядится, ток в цепи падает до нуля и тиристор  $VD15$  выключается. За счет индуктивности дросселя максимальное напряжение на конденсаторе превышает напряжение генератора.

В момент, когда необходимо выключить тиристоры моста, включается тиристор  $VD12$  цепи гашения. Конденсатор  $C4$  разряжается через часть обмотки трансформатора  $TV$ . Суммарное напряжение на обмотках трансформатора при разряде конденсатора превышает напряжение генератора и имеет противоположную полярность. Поэтому к точкам  $a$  и  $b$  моста на короткое время прикладывается напряжение обратной полярности и включенные до этого тиристоры моста выключаются. После разряда конденсатора  $C4$  ток через тиристор  $VD12$  прекращается и последний выключается. Затем любая из пар тиристоров моста вновь может быть включена.

Остальные указанные на схеме радиотехнические элементы выполняют вспомогательные функции. Обратный диодный мост ( $VD4$ ,  $VD5$ ,  $VD13$ ,  $VD14$ ) снимает перенапряжения с тиристоров моста при активноиндуктивной нагрузке. При выключении тока через обратные диоды энергия, накопленная в индуктивности нагрузки, сбрасывается в накопитель  $C1$ . Обратные диоды, шунтирующие обмотки трансформатора  $TV$  и дросселя  $L$ , предотвращают перезаряд и уменьшают перенапряжение на конденсаторе  $C4$  при коммутации цепи гашения.

#### Стабилизатор тока

Функциональная схема стабилизатора показана на рис. 94.

На вход модулятора поступает сигнал ошибки, равный разности напряжения опорного источника  $ОИ$  и падения напряжения на сопротивления  $R3$ , включен-

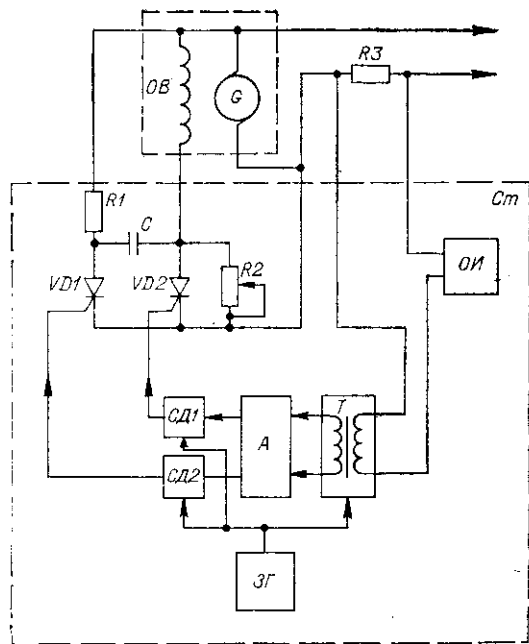


Рис. 94. Функциональная схема стабилизатора станции СВП-74.  
ОИ — опорный источник; А — усилитель переменного напряжения; СД1, СД2 — синхронные детекторы; ЗГ — задающий генератор; G — генератор; ОВ — обмотка возбуждения.

ного последовательно с источником поля. Напряжение на сопротивлении  $R3$  пропорционально силе тока в источнике поля. Сигнал ошибки модулятором преобразуется в импульсы, амплитуда которых равна сигналу ошибки. Через разделительный трансформатор импульсы подаются на усилитель переменного напряжения А. Усиленный сигнал детектируется двумя синхронными детекторами СД1 и СД2. Сигналы управления модулятором и детекторами поступают от задающего генератора ЗГ.

Когда сила тока в источнике поля меньше номинального значения и напряжение на  $R3$  меньше опорного напряжения, сигнал ошибки отрицателен. Тогда сигнал ошибки проходит через синхронный детектор СД1 и включает тиристор VD2.

Если сила тока превысит номинальное значение, сигнал ошибки станет положительным и пройдет через детектор СД2, включив тиристор VD1. Тиристоры VD1 и VD2 работают в схеме простого тиристорного ключа, аналогичного коммутатору балансного сопротивления (рис. 93). Конденсатор С служит для гашения тиристора VD2, а сопротивление  $R1$  — для зарядки конденсатора С до напряжения генератора G.

Включаясь, тиристор VD2 шунтирует сопротивление  $R2$ , соединенное последовательно с обмоткой возбуждения генера-

тора ОВ. Ток через обмотку увеличивается, и возрастает ток в нагрузке генератора. При включении тиристора VD1 тиристор VD2 выключается и ток генератора уменьшается. Периодическим включением и выключением тиристора VD2 ток в нагрузке поддерживается около номинального значения. Требуемая сила тока устанавливается регулированием напряжения опорного источника и изменением сопротивления  $R3$ .

Блок управления (БУ) формирует последовательность импульсов управления коммутацией тока в линии АВ и цепей измерительной аппаратуры. Схема блока управления показана на рис. 95, а. Он содержит блок питания БП, задающий генератор ЗГ и субблоки первого СЧ1, второго счетчика СЧ2, дешифратора Д и распределителя Р. Блок питания БП преобразует напряжение аккумуляторов 12 В в стабилизированное постоянное напряжение 5 В для питания схемы БУ.

Задающий кварцевый генератор ЗГ вырабатывает стабильный по частоте сигнал 100 кГц. Счетчик СЧ1 содержит цепочку последовательно включенных триггеров, формирующих из сигнала ЗГ периодические импульсы с различным периодом следования. Каждый триггер увеличивает период следования импульсов в два раза. С помощью переключателя, установленного на панели счетчика, с одного из его выходов на вход дешифратора Д могут быть

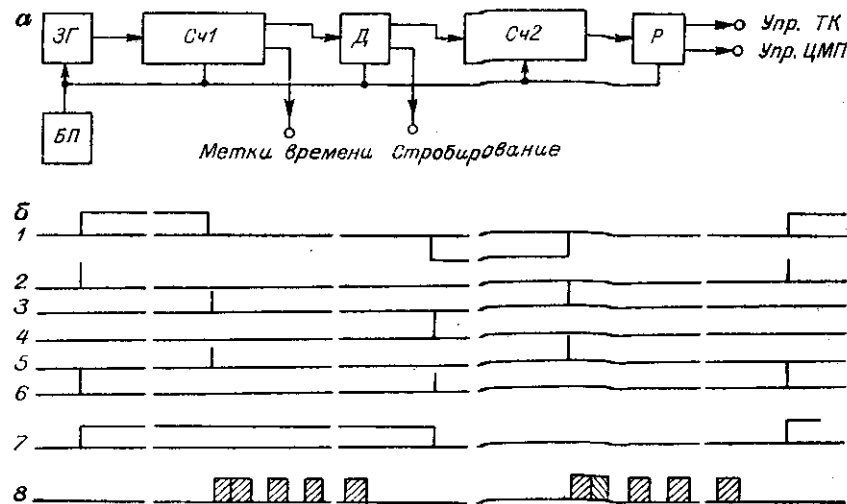


Рис. 95. Структурная схема блока управления станции СВП-74 (а) и временная диаграмма сигналов на выходе блока (б).

БП — блок питания; ЗГ — задающий генератор; СЧ1, СЧ2 — счетчики; Д — дешифратор; Р — распределитель.  
1 — форма тока в линии АВ; сигнал: 2 — включения тока положительного направления, 3 — гашения, 4 — включения тока отрицательного направления, 5, 6 — включения и выключения блока сопротивлений, 7 — полярности, 8 — стробирования.

поданы импульсы с различных триггеров цепочки с периодом следования от 0,8 мс до 3,3 с. На второй выход счетчика *Сч1* поступают импульсы с периодом 0,82 или 3,3 с, используемые в качестве меток времени регистратора *Р* — осциллографа ЭПО-9.

Дешифратор увеличивает период следования импульсов, поступающих со счетчика *Сч1*, в 32 раза. Он также формирует серию импульсов стробирования, смещенных на определенные интервалы времени относительно импульсов на выходе дешифратора. Импульсы стробирования управляют коммутирующими элементами импульсных приборов, фиксируя момент отсчета напряжения в измерительной линии.

Счетчик *Сч2*, так же как и *Сч1*, содержит цепочку триггеров, дополнительно увеличивающих период следования импульсов. Переключателем, имеющимся на панели счетчика *Сч2*, можно установить период следования импульсов, поступающих с выхода счетчика *Сч2* на вход распределителя, в 1—1024 раза большим, чем на входе счетчика *Сч2*.

Распределитель содержит логические схемы, которые из поступающих на его вход периодических импульсов формируют последовательность импульсов управления тиристорами: включение тока положительного и отрицательного направления в линии *АВ*, гашение моста, включение балластного сопротивления и другие необходимые для работы самого блока управления.

#### Измерительные приборы

В состав станции СВП-74 входят два одинаковых импульсных прибора ИМП1 и ИМП2, прибор переменного тока (ППТ) и регистратор (*Р*) — шлейфный осциллограф типа ЭПО-9 (рис. 92).

Импульсные приборы служат для регистрации напряжения при работе в режимах одиночных импульсов тока, однополярных и разнополярных импульсов. При коротких импульсах возбуждающего тока (до 3,3 с) и регистрации вторичного напряжения через 1,6—3000 мс ИМП работают в режиме стробирования и измеряют мгновенные значения напряжения в фиксированные моменты времени относительно фронта импульса тока. Те же ИМП служат предварительными усилителями при записи напряжения на фотоленту с помощью осциллографа ЭПО-9 при работах с длительными импульсами тока и длительной регистрации роста или спада ВП.

Структурная схема импульсного прибора показана на рис. 96. Напряжение из линии *МВ* поступает на вход усилителя 4 и регистрируется с помощью стрелочного индикатора *РА* или подается на гнезда *Вых.*, к которым подключается шлейфный осциллограф. Компенсатор 2 служит для компенсации постоянной естественной разности потенциалов между электродами *М* и *Н*.

Источником питания ИМП служат 12-вольтовые аккумуляторы станции. Преобразователь 1 создает постоянное напряжение,

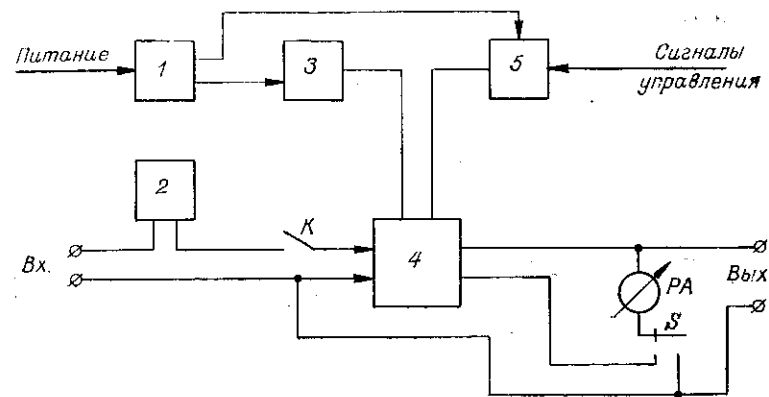


Рис. 96. Функциональная схема измерительного прибора станции СВП-74. 1 — преобразователь; 2 — компенсатор; 3 — стабилизатор; 4 — усилитель; 5 — синхронизатор.

требуемое для питания узлов прибора, при этом питание усилителя 4 стабилизируется специальным стабилизатором 3. Сигналы управления, синхронизирующие работу ИМП с коммутацией тока в линии *АВ*, поступают с блока управления на синхронизатор 5, который формирует сигналы управления реле.

При работе ИМП в режиме стробирования контакты реле *К* замыкаются на короткое время в заданные моменты времени относительно фронта импульса тока и показания индикатора *РА* соответствуют напряжению в моменты замыкания контактов *К*.

Усилитель 4 имеет два выхода, на один из которых сигнал поступает при использовании импульсов одного направления, на второй — при использовании импульсов обратного направления. При работе в режиме разнополярных импульсов индикатор *РА* переключателем *С* включается между двумя выходами и его показания соответствуют алгебраической разности напряжений ВП после двух соседних импульсов тока разного направления.

При использовании осциллографа сигналы управления реле ИМП поступают от внутреннего генератора с частотой 70 Гц. При этом ИМП работает в режиме непрерывного усиления напряжения, поступающего из линии *МВ*. В моменты включения и выключения тока в линии *АВ* шкала ИМП автоматически переключается по сигналам, поступающим из блока управления.

Установленный на входе ИМП компенсатор естественной поляризации 2 содержит источник напряжения — 1,5-вольтовый гальванический элемент, делитель напряжения, состоящий из двух 10-позиционных переключателей «грубо» и «точно», и потенциометр плавной регулировки. Компенсатор позволяет устанавливать напряжение с погрешностью до 10 мкВ.

Прибор переменного тока служит для определения переменного напряжения в линии  $MN$  и с помощью шунта силы тока в линии  $AB$  при работе с гармоническими сигналами. Прибор представляет собой избирательный усилитель с детектором на выходе. Коммутацией цепей прибора рабочую частоту усилителя можно установить равной 2,44; 4,88; 9,76 или 19,5 Гц, что соответствует рабочим частотам коммутаторов тока линии  $AB$ . Напряжение отсчитывается по стрелочному индикатору, установленному на выходе детектора.

Прибор имеет 11 пределов напряжения — от 30 мкВ до 3 В, которые устанавливаются переключателем пределов. Источниками питания прибора служат встроенные батареи типа 3336. При работе прибор устанавливается на столе в измерительной установке или используется в переносном варианте.

#### Порядок работы со станцией

Автомобили генераторной и измерительной установок размещают на исследуемом участке в удобном для подъезда месте на расстоянии

до 50 м один от другого и соединяют между собой кабелями управления, связи и компенсации. Устраивают токовые заземления и подключают их с помощью проводов к клеммам  $A$  и  $B$  выходного щитка генераторной установки.

Корпуса автомобилей надежно заземляют. При работе с генераторной установкой необходимо строго соблюдать правила техники безопасности, предусмотренные инструкцией [107].

В исследуемых точках профиля устанавливают два или четыре неполяризуемых электрода и соединяют их проводами с клеммами  $M_1N_1$  и  $M_2N_2$  входного щитка измерительной установки. Одновременные измерения на двух взаимно перпендикулярных линиях дают сведения о векторе поля ВП.

В работах на переменном токе при измерениях модуля напряжения измерительная линия  $MN$  становится автономной, и в ней в качестве заземлений можно использовать металлические шпильки. После проверки сопротивления изоляции силовых цепей, системы защиты станции и калибровки измерительной аппаратуры станция готова к работе.

Перечисленные выше геофизические параметры измеряют в разных режимах тока. Кажущуюся поляризуемость при поисковых площадных и маршрутных съемках целесообразно измерять в режиме РПИ-2 с длительностью импульсов от 1,65 до 6,6 с и отсчетом через 0,1 с после выключения тока. При этом импульсный прибор работает в режиме стробирования. В некоторых, особо важных случаях для надежного выявления аномалий ВП, создаваемых массивными рудными телами, целесообразно использовать длительную зарядку до 30—60 с и записывать  $\Delta U_{пр}$  и  $\Delta U_{вп}$  осциллографом на фотоленту.

Значение  $\Delta U_{пр}$ , полученное в фиксированный момент пропускания тока, вместе с данными о токе используют для вычисления

кажущегося удельного сопротивления. Для самостоятельных работ по методу сопротивления удобнее всего использовать переменный ток, тогда измерительный прибор не связан с генераторной установкой, не нужно компенсировать естественное поле, в связи с чем достигается весьма высокая производительность съемки.

При работах методом ВП на переменном токе, целесообразных в районах с высоким уровнем помех, прибором переменного тока измеряют модуль и мнимую составляющую напряжения в линии  $MN$ . С помощью специального компенсатора  $KI$ , подключенного к шунту  $R2$  в линии  $AB$  (рис. 92), после измерений модуля компенсируют вещественную составляющую напряжения. Остаток напряжения равен мнимой составляющей, а отношение ее к модулю практически равно выраженному в радианах углу сдвига фазы напряжения в линии  $MN$  относительно тока в линии  $AB$ .

Для учета индукционных эффектов при фазовых измерениях наблюдения выполняют на одной или нескольких парах частот тока. Сдвиг фазы ВП вычисляют по формуле

$$\Phi_{ВП} = [\omega_1 \Phi_{изм}(\omega_2) - \omega_2 \Phi_{изм}(\omega_1)] / (\omega_1 - \omega_2), \quad (280)$$

где  $\Phi_{изм}(\omega)$  — измеренные значения сдвига фазы;  $\omega$  — частота тока.

Необходимо отметить, что при работах на переменном токе мешающее влияние индукционных эффектов возрастает с уменьшением расстояния между проводами линий  $AB$  и  $MN$ , поэтому на положение проводов надо обращать серьезное внимание.

Переходную характеристику вторичного электрического поля в максимальном диапазоне времени снимают для определения оптимального режима тока при последующих массовых измерениях кажущейся поляризуемости, а также для детального изучения и дифференциации аномалий ВП. Измерения начинают с режима РПИ-2 и изучения ранней стадии вторичного поля (от 1 мс до 2—5 с) и продолжают в режиме РПИ-6 для изучения интервала времени от 0,1 до 60 с. Самую позднюю стадию ВП целесообразно изучать в режиме одиночных длительных импульсов с зарядкой 15; 60; 240; 960 с с осциллографической записью полного спада ВП. Можно также использовать режим однополярных периодических импульсов и импульсный прибор с визуальной регистрацией по стрелочному индикатору.

Дифференциальную кажущуюся поляризуемость в средней части переходного процесса ВП измеряют в режиме РПИ-2 или РПИ-6 при постоянном отношении длительности импульса тока к моменту отсчета  $t_3/t$  и меняющихся значений  $t_3$  и  $t$ . В поздней стадии ВП вычисляют  $\eta_k$  графически по переходной характеристике, построенной в логарифмическом масштабе времени.

Нелинейные эффекты ВП на импульсах постоянного тока снимают в режиме РПИ-6 или с одиночными импульсами тока одного и другого знака. При этом измерительные электроды надо стремиться расположить на линии равного потенциала поля ВП

при одном из направлений тока. Методика измерений с такой компенсационной установкой изложена ниже.

Нелинейные эффекты ВП на переменном токе лучше всего обнаруживаются при том же расположении измерительных электродов. Наблюдения НВП заключаются в том, что сначала включают переменный ток (частотой 2,44 Гц) и компенсирует активную составляющую напряжения, так что на достаточно высокой шкале измерительного прибора остается лишь мнимая составляющая. Затем включают однополярные импульсы тока той же частоты и в течение 10—30 с наблюдают за изменением мнимой составляющей. Далее на 10—30 с вновь включают переменный ток, после чего включают однополярные импульсы при другом направлении тока и повторяют наблюдения мнимой составляющей напряжения. Относительные изменения последней с учетом их знака и временного хода используют в последующей интерпретации полученных данных.

### СТАНЦИЯ ВП-Ф \*

**Назначение и технические характеристики** Переносная аппаратура ВП-Ф разработана СКБ Казахского опытно-экспериментального завода геофизических приборов, Казахским филиалом ВИРГ НПО «Геофизика» и ВНИИ геофизикой НПО «Союзгеофизика». Промышленное производство осуществляет Казахский опытно-экспериментальный завод геофизических приборов.

Станция ВП-Ф предназначена для работ методами ВП и сопротивления на переменном токе инфранизкой частоты. Она отличается повышенной помехозащищенностью за счет узкополосной фильтрации полезного сигнала, накопления и осреднения измеряемых величин.

С помощью аппаратуры ВП-Ф измеряют напряжение в линии *MN*, ток в линии *AB*, по которым определяют  $\rho_k$  и сдвиг фазы между первой и третьей гармониками напряжения.

#### Технические характеристики генераторной установки

|                                               |                                 |
|-----------------------------------------------|---------------------------------|
| Рабочие частоты, Гц                           | 0,30; 0,61; 1,22;<br>2,44; 4,88 |
| Мощность генератора, Вт:                      |                                 |
| от бензоэлектрического агрегата АБ-0,5        | До 300                          |
| от батарей сухих элементов и аккумуляторов    | » 50                            |
| Диапазон выходных токов, А                    | 0,1—4                           |
| Диапазон выходных напряжений, В               | 70—400                          |
| Масса без источников питания, кг              | 12,5                            |
| Масса бензоэлектрического агрегата АБ-0,5, кг | 23                              |

#### Технические характеристики измерителя

|                                          |             |
|------------------------------------------|-------------|
| Диапазон измеряемого напряжения, мВ      | 0,03—10 000 |
| Диапазон измеряемого сдвига фазы, градус | —30÷30      |

\* Раздел подготовлен В. Д. Жильниковым, В. Ф. Сарбашом и В. И. Лемцом.

|                                                               |            |
|---------------------------------------------------------------|------------|
| Основная приведенная погрешность измерения напряжения, %      | Не более 2 |
| Основная абсолютная погрешность измерения сдвига фазы, градус | 0,06       |
| Входное сопротивление измерительного канала, МОм              | Не менее 3 |
| Масса измерителя с источником питания, кг                     | 5,8        |
| Отсчет напряжения                                             | Стрелочный |
| Отсчет сдвига фазы                                            | Цифровой   |

В комплект станции входят: генератор, три измерителя, четыре радиостанции для связи между операторами генератора измерителей, бензоэлектрический агрегат АБ-0,5, полевое оборудование, запасной инструмент и приспособления для переноски аппаратуры и оборудования. Станция установлена на автомобиле ГАЗ-66 в специальном кузове типа СГК. Измерители из комплекта можно использовать в сочетании с другими генераторными установками, дающими прямоугольный переменный ток указанной частоты и обеспечивающими стабильность фазовых соотношений первой и третьей гармоник тока.

#### Структурная схема

В аппаратуре ВП-Ф применен генератор с выходным напряжением прямоугольной формы. Из сигналов в измерительной линии *MN* избирательные усилители выделяют напряжения первой и третьей гармоник. Структурная схема генераторной установки станции приведена на рис. 97. Напряжение от бензоэлектрического агрегата или другого источника тока 1 поступает в блок питания генератора 2, вырабатывающий постоянное напряжение, необходимое для силового инвертора 3, который преобразует это напряжение в переменное прямоугольной формы и подает его в заземленную токовую линию *AB*. Силовой инвертор управляется формирователем импульсов 4, который через делитель частоты 5 связан с кварцевым генератором 6.

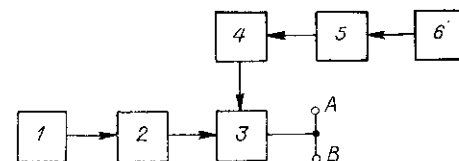
Аппаратура ВП-Ф измеряет разность фаз первой и третьей гармоник сигнала, которые имеют наибольшие амплитуды в спектре прямоугольного напряжения. Это обеспечивает автономность измерительной установки относительно генераторной и исключает влияние индукционных эффектов в области малого параметра поля. Сдвиг фазы ВП определяется из соотношения

$$\text{Фвп} = 3\omega_1 \Delta t / 2, \quad (281)$$

где  $\Delta t$  — измеряемая прибором разность между моментами времени перехода через нуль сигналов первой и третьей гармоник;  $\omega_1$  — частота первой гармоники, рад/с.

Рис. 97. Структурная схема станции ВП-Ф.

1 — источник тока; 2 — блок питания генератора; 3 — силовой инвертор; 4 — формирователь импульсов; 5 — делитель частоты; 6 — кварцевый генератор.



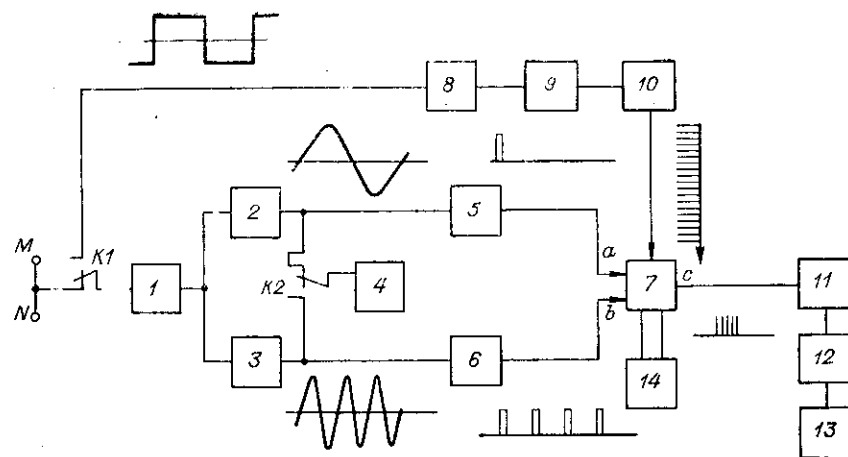


Рис. 98. Структурная схема измерителя станции ВП-Ф.

1 — широкополосный предусилитель; усилители: 2 — первой, 3 — второй гармоники; 4 — вольтметр; 5, 6 — формирователи импульсов отметки фазы; 7 — селектор; 8 — калибратор; 9 — делитель частоты; 10 — генератор импульсов заполнения; 11, 12 — электронные счетчики; 13 — цифровое табло; 14 — счетчик.

Соотношение (281), как и выражение (280), выведено из предположения, что в интервале частот, ограниченном первой и третьей гармониками переменного тока, сдвиг фазы, обусловленный электрохимическими процессами, не зависит от частоты, а индукционный сдвиг фазы прямо пропорционален частоте.

Структурная схема измерителя приведена на рис. 98. Сигнал с линии *MN* через переключатель *K1* и широкополосный предусилитель 1 поступает на входы двух избирательных усилителей первой 2 и второй 3 гармоник. Амплитуду сигнала первой гармоники после усилителя можно измерить, подключив вольтметр 4 с помощью переключателя *K2*. С выхода усилителей 2 и 3 синусоидальные сигналы поступают в формирователи импульсов отметки фазы 5 и 6, вырабатывающие импульсы напряжения в моменты перехода гармоник через нуль, которые подаются на два входа селектора 7. К третьему входу селектора подключен генератор импульсов заполнения 10, имеющий частоту следования импульсов  $f_3$ .

При поступлении импульса первой гармоники на вход *a* селектора появляются на выходе *c* импульсы заполнения, которые прекращаются после того, как на вход *b* селектора поступит импульс второй гармоники. Таким образом, на выходе селектора формируется пачка импульсов с частотой  $f_3$  и длительностью  $\Delta t = n/f_3$ , где  $n$  — число импульсов в пачке, которое считается электронными счетчиками 11 и 12 и фиксируется на цифровом табло 13.

С учетом перечисленных операций и формулы (281) искомый сдвиг фазы, выраженный в градусах, можно записать в виде

$$\varphi_{\text{ВП}} = 3n\beta/2, \quad (282)$$

где  $\beta = f_1 \cdot 360^\circ / f_3$ ;  $f_1 = \omega_1 / (2\pi)$  — частота первой гармоники, Гц.

Значение  $\beta$  можно рассматривать как цену деления единицы младшего разряда электронного счетчика, выраженную в градусах. Она определяется соотношением рабочей  $f_1$  и частоты заполнения  $f_3$ , которое в аппаратуре ВП-Ф поддерживается равным  $1,22 \cdot 10^{-4}$  независимо от рабочей частоты за счет изменения  $f_3$ . Цену деления  $\beta = 0,044^\circ$  вместе с коэффициентом  $3/2$  учитывают при вычислении  $\varphi_{\text{ВП}}$  по формуле (282). Высокая стабильность частот  $f_1$  и  $f_3$  обеспечена применением генераторов с кварцевыми резонаторами, поэтому  $\beta$  в процессе работ ВП-Ф практически не изменяется.

Для увеличения точности и помехоустойчивости измерений  $n$  определяют как среднее за серию периодов рабочей частоты (от 2 до 32). Эту операцию осуществляют счетчики периодов 14 и осредняющий 12. Счетчик периодов 14, выполняя функцию элемента запуска, включает селектор в действие на заданное число периодов рабочей частоты и прекращает его работу независимо от поступления команд на входы *a* и *b* селектора 7. Счетчик 12 делит частоту следования импульсов заполнения на число периодов, установленное на счетчике 14.

Для учета собственного сдвига фазы в аппаратуре предусмотрена калибровка измерительного канала. При этом на вход измерителя через переключатель *K1* с выхода калибратора 8, управляемого делителем частоты 9, поступает прямоугольное напряжение рабочей частоты. Используемое в формуле (282)  $n$  определяют как разность сигналов, поочередно снятых с измерительных электродов  $n_s$  и калибратора  $n_k$ :  $n = n_s - n_k$ .

Ток в линии *AB* не имеет идеальную прямоугольную форму, так как выходное сопротивление генератора и переходное сопротивление заземлений являются комплексными величинами. Это приводит к дополнительному сдвигу гармоник тока между собой, влияющему на отсчет  $\varphi_{\text{ВП}}$ . Этот сдвиг фазы  $\varphi_{\text{AB}}$  специально измеряют, подключая измеритель ВП-Ф к шунту (активному сопротивлению), последовательно включенному в токовую линию, и в дальнейшем в виде поправки исключают из измеренных значений сдвига фазы.

## ПРОИЗВОДСТВО РАБОТ

Схемы расположения  
электродов

Схемы расположения токовых и измерительных электродов могут быть весьма многообразными. В методе ВП принципиально возможны

все виды электропрофилирования и вертикального зондирования, применяемые в методе сопротивлений, и сверх того некоторые

иные, так называемые дифференциальные установки, в которых электроды располагаются так, что разность потенциалов между измерительными электродами к концу зарядки практически равна нулю.

Использование в методе ВП мощных поляризующих токов связано с устройством громоздких заземлений. Например, при разностях 1—2 км и токе 15—20 А на каждое заземление употребляется по 100 шпилек и более. Перемещение заземлений оказывается весьма трудоемким, и производительность работ во многом определяется числом перестановок заземлений на исследуемой территории. Поэтому с начала практического применения метода ВП предпочтение отдавалось схеме срединного градиента, в которой измерительные электроды перемещают по одному или нескольким профилям, расположенным в средней части между неподвижными токовыми электродами [221]. Вблизи токовых электродов, в радиусе до 150—200 м, измерения не проводили из-за боязни уменьшения глубины исследований. Глубину тел определяли с помощью четырехэлектродного симметричного зондирования, характеризуемого тем, что последовательно меняется разнос токовых электродов, а центр линии  $MN$  остается неизменным. Такая методика поисковых работ в свое время была поддержана сотрудниками ВИТР [143] и получила широкое распространение.

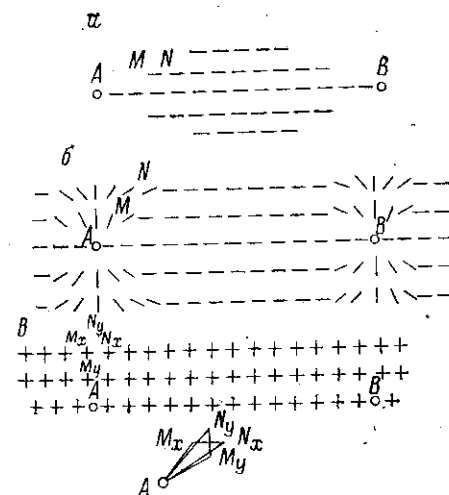
Однако из теоретических исследований следует, что исключение из измеряемой части профиля приэлектродных участков является неоправданным. При любом положении токового электрода относительно изотропного поляризуемого тела можно выявить аномалию ВП. Размещение электрода существенно влияет на форму графика и положение экстремума кажущейся поляризуемости относительно тела (рис. 51), однако эти изменения  $\eta_k$  только облегчают определение положения тела.

При поисковых работах достаточно взять большой разнос токовых электродов, заведомо обеспечивающий требуемую глубину исследований, и выполнить съемку  $\eta_k$  на всей территории между электродами и за ними, чтобы уверенно решить первоочередной вопрос: имеются ли на этой территории аномалии ВП. Во многих случаях аномалии не обнаруживаются и работы на обследованной территории могут считаться законченными. При этом максимальное увеличение обследуемой с фиксированными токовыми электродами территории приводит к благоприятному экономическому результату.

В тех случаях, когда в пределах обследованной территории выявлены аномалии ВП, для надежного определения местоположения поляризованных тел необходимо дополнительно исследовать аномальные участки при новом расположении токовых электродов. Если аномалия ВП первоначально находилась вдали от электродов  $AB$ , то детализационные работы следует проводить с расположением одного из них в центре этой аномалии. И наобо-

Рис 99. Схемы отработки профилей при работах с установкой градиента:

$a$  — при ориентировке измерительной линии вдоль линии  $AB$ ;  $b$  — при изменении ориентировки измерительной линии согласно токовым линиям первичного поля;  $в$  — при векторной съемке.



рот, если аномалия ВП находилась вблизи токового электрода, то дальнейшее исследование надо вести при размещении этого электрода за пределами аномалии. Такие двукратные измерения позволяют определить и контур проекции рудного объекта на поверхность земли, и глубину его залегания, и направление падения. В результате отпадает необходимость в проведении вертикальных зондирований и повышается производительность работ. При теоретических расчетах исходили из предположения, что линия  $MN$  ориентирована вдоль токовых линий первичного поля. При площадных съемках с неподвижными электродами  $A$  и  $B$  направление токовых линий на планшете меняется от точки к точке. В этих условиях необходимо применять один из следующих приемов для соблюдения правильного положения измерительной линии:

а) проводить измерения с линией  $MN$  вдоль профиля только в той части планшета, где токовые линии параллельны линии  $AB$ ;  
б) изменять ориентировку линии  $MN$ , придерживаясь направления токовых линий;

в) проводить векторную съемку, измеряя две взаимно перпендикулярные составляющие поляризуемого поля и поля ВП.

Первый прием характерен для схемы срединного градиента, но может быть использован и для измерений с внешних сторон отрезка  $AB$ . Однако участки профилей, противолежащие электродам  $A$  и  $B$ , остаются неизмеряемыми, и для равномерной съемки всей территории приходится прибегать к ромбической сети расположения токовых электродов (рис. 99,  $a$ ). Такая система отработки площади предусмотрена инструкцией [107].

Второй прием позволяет не делать пропусков на участках профилей, противолежащих токовым электродам, и пользоваться прямоугольной или любой иной сетью расположения электродов  $A$  и  $B$ . Практически достаточно на нескольких точках профиля, находящихся в окрестностях проекции токового электрода на этот профиль, ориентировать линию  $MN$  в направлении на этот электрод, чтобы достичь нужного эффекта. На остальной части профиля

измерительная линия ориентируется как обычно вдоль профиля (рис. 99, б). Сигналом к изменению ориентировки линии  $MN$  служит наблюдаемое при приближении к проекции токового электрода на исследуемый профиль уменьшение параллельной профилю составляющей поляризующего поля.

Векторная съемка дает наиболее полную информацию об аномальном поле ВП, но одновременно и наиболее трудоемка, поскольку число измерений удваивается и усложняется обработка материалов. Можно использовать три измерительных электрода, один из которых является общим для обеих составляющих поля, или четыре электрода (рис. 99, в). В первом случае точка записи результатов измерений относится к общему электроду, во втором случае — к общему центру обеих пар электродов.

Строгое определение кажущейся поляризуемости должно учитывать различие направлений поля ВП и поляризующего поля. Кажущаяся поляризуемость равна отношению проекции вектора поля ВП на направление поляризующего поля к величине последнего:

$$\eta_k = E_{ВП} \cos \alpha / E_{пр}, \quad (283)$$

где  $E_{ВП}$  и  $E_{пр}$  — модули векторов;  $\alpha$  — угол между векторами.

С этой точки зрения обсуждаемые приемы расположения линии  $MN$  сводятся или к прямому измерению составляющей поля ВП по направлению поляризующего поля, или к измерению полных векторов обоих полей и последующему учету угла между ними.

По данным векторной съемки кроме кажущейся поляризуемости) можно вычислить еще один параметр:

$$\nu_k = E_{ВП} \sin \alpha / E_{пр}, \quad (284)$$

характеризующий перпендикулярную к поляризующему полю составляющую поля ВП и в некоторой степени отражающий свойства «чистых» аномалий ВП, измеряемых с помощью дифференциальных установок.

Схема с неподвижными токовыми электродами, которую мы будем называть схемой или установкой градиента, опуская слово «срединного» в знак того, что измерения проводят не только посередине линии  $AB$ , является самой удобной, когда мощность источника поляризующего тока (наряду с условиями рельефа местности) позволяет использовать большие разности  $AB$ .

В условиях труднодоступных районов, где нельзя применять аппаратуру, смонтированную на автомобиле, и приходится ограничиваться малой силой тока и небольшим разномом электродов, удобнее использовать установку трехэлектродного комбинированного профилирования. В этом случае расстояние между тремя электродами: одним токовым и двумя измерительными — сохраняется постоянным и все электроды перемещаются по профилю от точки к точке. Двукратные измерения с токовым электро-

дом, расположенным по одну и по другую сторону от измерительных, дают две ветви графиков  $\eta_k$  и  $\rho_k$  комбинированного профилирования (рис. 49). Комбинированное профилирование обладает более высокой разрешающей способностью, чем четырехэлектродное симметричное профилирование. Кроме того, по профилю перемещается лишь один токовый электрод, в то время как другой находится на «бесконечности» и остается неподвижным. Источник поляризующего тока устанавливается в линии «бесконечности» и также остается неподвижным. Использование автоматического переключателя чувствительности измерительного прибора и катушки с коллектором, обеспечивающим сохранение контакта проводов в линии «бесконечности» по мере их растягивания по профилю и одновременно уменьшение бригады, выполняющей полевые работы, на 1—2 человека, делают комбинированное профилирование более выгодным, чем симметричное.

В методе сопротивлений принято комбинированное профилирование проводить с тремя токовыми электродами, один из которых в «бесконечности», а два на профиле по обе стороны от пары измерительных электродов. В методе ВП, когда для обеспечения нужного тока для заземления используется большое количество шпилек, целесообразно измерения вести с двумя токовыми электродами и двумя парами измерительных электродов, располагаемыми по обе стороны от токового электрода. Точкой записи результатов измерений остается центр измерительной линии. Графики  $\eta_k$  и  $\rho_k$  вычерчивают для каждой линии  $MN$  отдельно: для установки  $AO$ , когда линия  $MN$  расположена справа от токового электрода, и для установки  $OB$ , когда она слева. На левом краю профиля имеются графики лишь для установки  $OB$ , а на правом краю — лишь для установки  $OA$  (рис. 76 и 77). Но это не создает затруднений в интерпретации, поскольку на обоих концах профиля имеются графики  $\eta_k$ , характеризующие верхние «ветви» комбинированного профилирования.

Дипольное профилирование в дополнение к достоинствам комбинированного профилирования, касающимся разрешающей способности, не требует удаления одного из токовых электродов на «бесконечность». Разобшение линий  $AB$  и  $MN$  резко снижает взаимную индукцию проводов этих линий и индукционные эффекты в земле вблизи измерительного диполя. Дипольное профилирование — практически единственная установка, используемая за рубежом при работах методом ВП на переменном токе [336, 366]. По данным дипольного профилирования строят вертикальные геоэлектрические разрезы. Для этого результаты измерений  $\eta_k$  и  $\rho_k$  относят к направленной в глубь земли вершине прямоугольного равнобедренного треугольника, основанием которого служит линия, соединяющая центры токового и измерительного диполей (рис. 100). Увеличение разности центров диполей приводит к росту глубины точки записи. В итоге многоразностного профили-

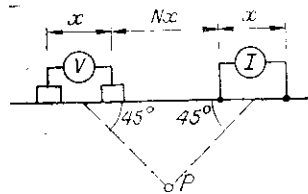


Рис. 100. Схема установки дипольного профилирования при работах методом ВП (по Ф. Халлофу [369]).

$I$  — токовый диполь;  $V$  — приемный диполь;  $P$  — точка записи результатов измерений;  $x$  — разнос электродов в диполях;  $Nx$  — расстояние между диполями.

рования получают сеть значений  $\eta_k$  и  $\rho_k$ , изолинии которых используют для определения положения поляризованного тела (рис. 101). Этот способ прост и довольно нагляден, но менее точен, чем интерпретация графиков  $\eta_k$  и  $\rho_k$  по профилю.

Недостаток дипольного профилирования по сравнению с комбинированным заключается в существенном уменьшении измеряемого напряжения ВП (поле диполя затухает обратно пропорционально кубу, а поле точечного источника — квадрату расстояния). Современные приборы имеют достаточно высокую чувствительность

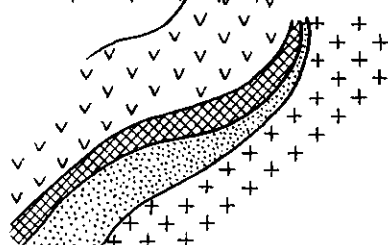
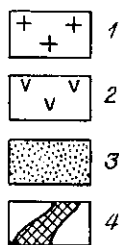
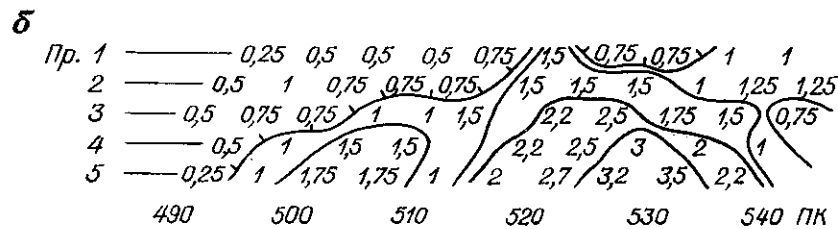
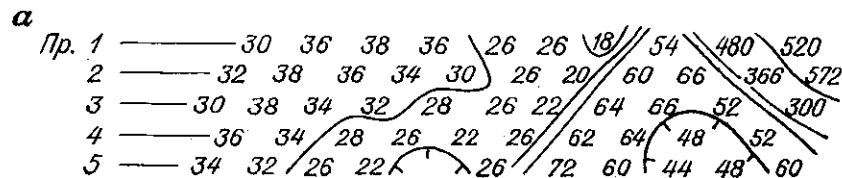


Рис. 101. Вертикальные разрезы изолиний кажущегося удельного сопротивления (а) и кажущейся поляризуемости (б), построенные по данным многоразносного дипольного профилирования [370].

1 — гранит; 2 — андезит; 3 — кварцит (метасадочная порода); 4 — вкрапленная руда (магнетит, пирит, халькопирит).

и обеспечивают надежное измерение ВП. Перспективы дальнейшего развития дипольных установок при поисках редкометалльных месторождений подтвердил в Приморье В. Н. Земцов [100].

Проблема дифференциальных установок связана с решением вопросов о нормировании регистрируемого аномального поля ВП и о способе компенсации поляризующего поля. В обычных установках в качестве нормирующей единицы служит значение поляризующего поля, на которое делят поле ВП для вычисления кажущейся поляризуемости. В дифференциальных установках составляющая поля ВП измеряется в условиях равенства нулю составляющей поляризующего поля. Эта составляющая поля ВП, очевидно, зависит от силы поляризующего тока, разноса электродов и от сопротивления среды, т. е. от всех факторов, определяющих полное значение поляризующего поля. Поэтому целесообразно измерять и использовать как меру нормирования модуль вектора поляризующего поля. Иначе можно лишь качественно интерпретировать результаты измерений с дифференциальными установками, оставляя открытым вопрос о значении поляризуемости и электропроводности источника аномалии ВП [253].

Практически дифференциальные установки осуществляются путем расположения электродов  $MN$  на линиях равного потенциала поляризующего поля. При этом возможны многие способы. На рис. 102 приведены результаты опытов, поставленных в 1954 г. над той моделью, исследования над которой описаны ранее (см. рис. 78). Помимо графиков  $\Delta U_{ВП}$ , соответствующих установке срединного градиента, показаны графики  $\Delta U_{ВП}$  для трех разновидностей дифференциальных установок. В первой из них линию  $MN$  располагали поперек поляризующего поля, токовые электроды находились вдали от модели, как в установке срединного градиента. Во второй электрод  $A$  перемещали по профилю ( $B$  находился на «бесконечности»), а измерительные электроды располагали по обе стороны от него, причем расстояние  $AM$  было постоянным,  $AN$  менялось для обеспечения равенства нулю  $\Delta U_{пр}$ . В третьей — электрод  $A$  располагали неподалеку от модели и он был неподвижным, а измерительные электроды разносили в обе стороны от него. В первой и третьей модификациях точкой записи служило положение электрода  $M$ , находившегося ближе к модели, чем  $N$ , а во второй — положение электрода  $A$ .

Во всех случаях измерено интенсивное поле ВП. Форма графиков  $\Delta U_{ВП}$  напоминает поведение аномального потенциала при горизонтальном возбуждающем поле. Для первой и второй модификации она характеризуется максимумом и минимумом, переход между которыми находится над моделью. Для третьей модификации над моделью получен максимум  $\Delta U_{ВП}$ , объясняемый тем, что неподвижный источник тока находился над моделью и поляризующее поле вблизи модели было почти вертикальным.

К числу дифференциальных относятся компенсационные установки, применяемые для измерений потенциала нелинейной ВП.

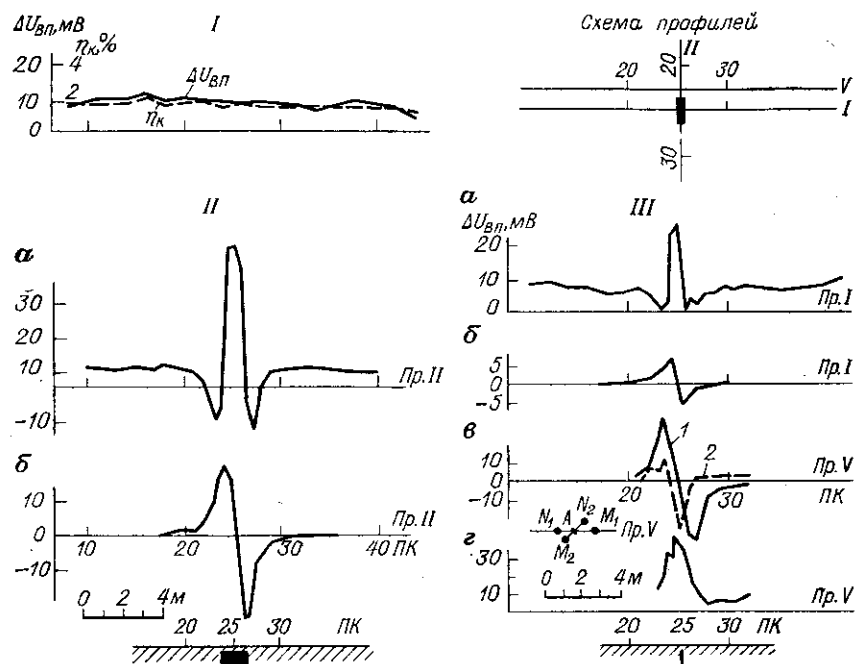


Рис. 102. Результаты измерений напряжения поля ВП.

Установки: I — без модели с установкой симметричного профилирования ( $AB = 20$  м;  $MN = 0,5$  м); II — по профилю вдоль простирания модели (железного листа); III — по профилю вкост простирания модели. а — установка срединного градиента ( $AB = 20$  м;  $MN = 0,5$  м); б — измерения с электродами  $MN$ , установленными внутри  $AB$  на линиях равного потенциала перпендикулярно к поляризующему полю (токовые электроды неподвижны,  $AB = 20$  м,  $MN = 1$  м); в — измерения с подвижным электродом  $A$ , по обе стороны от которого на линиях равного потенциала поляризующегося поля размещены измерительные электроды ( $AM = 1$  м, измерительная линия ориентирована вдоль профиля I или поперек его 2; точкой записи служит положение электрода  $A$ ); г — измерения с неподвижным электродом  $A$ , расположенном на ПК 22, и измерительными электродами, находящимися по обе стороны от него на линиях равного потенциала поляризующего поля (точкой записи служит положение электрода  $M$ ,двигающегося в направлении модели). Время зарядки 1 мин, разрядки 1 с,  $I = 5$  А.

Они отличаются от вышеописанных лишь тем, что измерительные электроды располагают так, чтобы приблизить к нулю наблюдаемую разность потенциалов поля ВП, а не поляризующего поля.

Физической основой дифференциальных установок является различие структуры аномального поля ВП и поляризующего поля, проявляющееся в несовпадении линий равного потенциала. Но оно проявляется и в несовпадении направлений векторов того и другого поля. Измерение векторов и вычисление параметра  $\eta_k$  равносильно применению первой из охарактеризованных выше дифференциальных установок. Для проверки этого теоретического положения в 1954 г. на Сажаевском месторождении близ г. Зырянска были проведены измерения с двумя измерительными электродами, располагавшимися на линиях равного потенциала

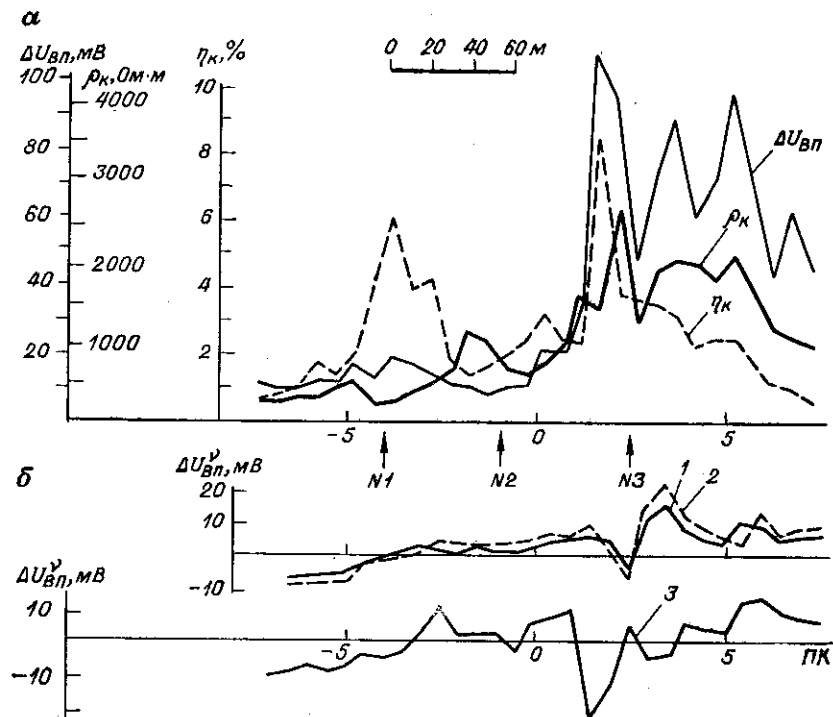


Рис. 103. Результаты измерений на полиметаллическом рудопоявлении с обычной установкой срединного градиента (а) и с расположением измерительных электродов внутри линии  $AB$  на линиях равного потенциала поляризующего поля (б).

Графики: 1 — при зарядке 10 с, 2 — при зарядке 60 с, 3 — вычисленные по данным векторной съемки.  
 $AB = 400$  м;  $MN = 10$  м;  $I = 10$  А.  
 $N1-N3$  — оси аномалий по методу заряда.

поляризующего поля, и с векторной трехэлектродной измерительной установкой. Графики измеренного дифференциального значения  $\Delta U_{ВП}^0$  при зарядке 10 с (график 1) и 60 с (график 2), а также  $\Delta U_{ВП}^0 = E_{ВП} MN \sin \alpha$ , вычисленного по данным векторной съемки, как и следовало ожидать, оказались сходными (рис. 103). Переходами от отрицательных значений  $\Delta U_{ВП}^0$  к положительным отмечены известные рудные тела у ПК 2, ПК—4.

Различие между измеренными и вычисленными значениями  $\Delta U_{ВП}$  наблюдается в районе ПК 0, где также имеется небольшое рудное тело. Это тело отметилось лишь по результатам векторной съемки. Причина различий, вероятно, связана с разным положением измерительных электродов во время измерений тем и другим способом и с резкой неоднородностью электрических свойств пород в пределах месторождения. Применение векторной съемки удобно в отношении нормирования поля ВП, которое осуществля-

ется путем вычисления параметра  $\eta_k$ . Одновременно можно вычислить  $\eta_k$ . Благодаря этому векторная съемка дает наиболее полную информацию.

При всех видах съемок определенную роль играет ориентировка поляризующего поля относительно большой оси тела, особенно если тело обладает высокой электрической проводимостью. При задании поля вдоль такого тела аномалия ВП имеет наибольшее значение. Поэтому при перемещении токового электрода по профилю можно ожидать такого положения, при котором условия поляризации тела будут наилучшими. С этой точки зрения установки профилирования имеют некоторое преимущество перед установкой градиента с неподвижными токовыми электродами. С другой стороны, и в установке градиента интенсивность аномалии зависит от положения электродов  $A$  и  $B$ .

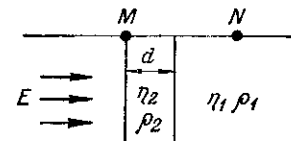
При изучении рудных тел, имеющих вытянутую форму, целесообразно прибегать к установке «продольного градиента», отличающейся от обычного «поперечного градиента» тем, что линии  $AB$  и  $MN$  располагают вдоль простиранья тела, но профиль, по которому перемещается центр измерительной линии, остается поперечным к простиранью тела. Установка продольного градиента особенно выгодна при изучении рудных тел, расположенных между крутопадающими плохо проводящими телами, служащими экранами для поперечного тока.

#### Разнос электродов

В наиболее благоприятных условиях однородной вмещающей среды глубина исследований с трехэлектродной установкой примерно равна расстоянию от центра линии  $MN$  до ближайшего токового электрода. Это следует из результатов теоретических расчетов поля ВП шара, согласно которым центр аномалии расположен от токового электрода на том же расстоянии, что и центр тела, находящегося под этим электродом (рис. 51). Таким образом, минимальный разнос электродов равен требуемой глубине исследований.

В условиях неоднородной вмещающей среды и, в частности, при наличии поверхностного слоя хорошо проводящих осадочных пород (наносов) требуемый разнос оказывается тем выше, чем больше мощность и электрическая проводимость этого слоя. Теоретическая оценка разноса дана в разделе, касающемся двухслойной среды (табл. 22). В частности, если электрическая проводимость наносов на порядок выше, чем у коренных пород, то и разнос  $AB$  должен на порядок превышать мощность наносов. Подобные свойства наносов довольно обычны для многих рудных районов, поэтому для тел, имеющих выход под наносы, оптимальным для установок профилирования можно считать разнос  $AO$ , не менее чем на порядок превышающий значение мощности наносов. При поисках «слепых» тел, не достигающих по глубине поверхности коренных пород, к указанному значению наносов следует добавить глубину залегания тела. Оптимальный разнос

Рис. 104. К выводу формулы для кажущейся поляризуемости над вертикальным пластом, находящимся в однородном горизонтальном поляризующем поле.



электродов для трехэлектродного профилирования вычисляется по формуле

$$AO = 2H_T \left( 1 + \frac{H_1}{H_T + H_1} \cdot \frac{\rho_2}{\rho_1} \right), \quad (285)$$

где  $H_T$  — глубина верхней кромки искомого тела;  $H_1$  — мощность верхнего слоя (наносов);  $\rho_1$  и  $\rho_2$  — удельное сопротивление верхнего и нижнего слоя;  $H_T \geq H_1$ .

При использовании установки градиента с неподвижными токовыми электродами желателен как можно больший разнос  $AB$ , чтобы с одной стоянки охватить исследованиями максимальную площадь. Во всяком случае он должен быть больше вычисленного по формуле (285). Для вычисления желаемого разноса с учетом мощности и удельного сопротивления наносов можно воспользоваться формулой

$$AB \geq 10H_T \left( 1 + \frac{H_1}{H_T + H_1} \cdot \frac{\rho_2}{\rho_1} \right). \quad (286)$$

Разнос  $MN$  определяется размером искомого объекта по направлению измерительной линии. В случае наземной съемки — это горизонтальная мощность объекта. Влияние разноса  $MN$  на кажущуюся поляризуемость покажем на примере измерений срединного градиента (рис. 104). Предположим, что профиль направлен перпендикулярно к простиранью вертикального пласта, имеющего мощность  $d$ , удельное сопротивление  $\rho_2$  и поляризуемость  $\eta_2$ . Примем, что электрод  $M$  находится на границе этого пласта, а электрод  $N$  — во вмещающей среде, имеющей удельное сопротивление  $\rho_1$  и поляризуемость  $\eta_1$ , причем  $MN$  в  $n$  раз больше мощности пласта  $d$ . Тогда, принимая во внимание, что измеряемые разности потенциалов являются суммами двух слагаемых, соответствующих падению напряжения на пласте и во вмещающей среде, получаем

$$\eta_k = \frac{\eta_1 \rho_1 (n-1) (1-\eta_2) + \eta_2 \rho_2 (1-\eta_1)}{\rho_1 (n-1) (1-\eta_2) + \rho_2 (1-\eta_1)}, \quad (287)$$

где  $n = MN/d \geq 1$ , откуда следует, что кажущаяся поляризуемость тем ближе к поляризуемости пласта, чем меньше  $n$  и больше  $\rho_2/\rho_1$ . При  $\rho_2 = \rho_1$  аномальная кажущаяся поляризуемость примерно во столько раз меньше избыточной поляризуемости пласта, во сколько разнос  $MN$  больше мощности пласта. Если разнос  $MN$  будет не больше полумощности пласта, то хотя бы в одной точке кажущаяся поляризуемость достигнет истинной поляризуемости пласта.

По мере увеличения глубины залегания поляризуемого тела ширина аномалии ВП возрастает и график  $\eta_k$  становится более плавным, так что роль разности  $MN$  ослабевает. С учетом этой тенденции за оптимальный можно принять разность  $MN$ , примерно равный ожидаемой горизонтальной мощности искоемых объектов.

#### Особенности скважинных измерений

В настоящее время известно и применяется на практике довольно большое количество способов (вариантов) скважинных работ. Формально можно классифицировать эти способы, основываясь на расположении токовых и измерительных электродов. Различают три класса способов:

1) скважина — поверхность;

2) поверхность — скважина;

3) скважина — скважина, причем в первом слове указано положение основного токового электрода (второй предполагается достаточно удаленным от измерительных электродов, чтобы его влияние не было решающим), а во втором — положение измерительных электродов, если используется градиент-установка, или подвижного измерительного электрода, если используется потенциал-установка. Для полной расшифровки способа название класса дополняется указанием конкретного положения электродов [268].

В качестве скважинного токового электрода обычно служит свинцовый груз, к которому подсоединяются все жилы каротажного кабеля. Скважинные измерительные электроды изготавливают из свинцовой проволоки, как это делается для каротажа методом естественного поля, или из медной проволоки, помещаемой в специальный сосуд, заполненный раствором медного купороса с добавкой желатина или агар-агара [107, 259]. Для работы в сухих скважинах измерительные электроды обматывают несколькими слоями войлока, который регулярно смачивают водой.

Во всех исследуемых скважинах обязательно выполняют измерения с трехэлектродной «каротажной» установкой для определения свойств пород вблизи ствола скважины. При этом расстояние между электродом  $A$  и центром линии  $MN$  чаще всего составляет 5 или 10 м, а разность  $MN = 1-10$  м, в зависимости от мощности рудных тел. «Каротажный» токовый электрод изготавливают, как обычно, из свинцовой проволоки. Измерения выполняют, как правило, с остановкой снаряда на каждой точке \*. При перемещении снаряда впереди должны находиться электроды  $MN$ , иначе они будут попадать на те места скважины, где перед этим находился токовый электрод и где велико влияние медленно спадающего напряжения ВП, возникшего в области высокой плотности поляризующего тока вблизи токового электрода. Напряженность поляризующего поля в районе измерительных

электродов должна быть меньше 5 В/м, чтобы процессы ВП оставались линейными.

При работах способом скважина—поверхность глубину погружения токового электрода выбирают такой, чтобы расстояние от электрода до рудного тела было, по возможности, наименьшим. Иногда для повышения надежности определения местоположения тела измеряют  $\eta_k$  при нескольких положениях токового электрода. В пределах нужного интервала глубины токовый электрод помещают в том месте, где сопротивление заземления наименьшее. Последнее оценивают путем включения в линию  $AB$  батареи сухих элементов и наблюдения изменений тока при перемещении токового электрода по скважине, т. е. выполняют наблюдения по методу «скользящих контактов» с тем электродом, который в дальнейшем используют для работ в варианте скважина—поверхность. Электрод останавливают на месте, где отмечается максимальный ток.

Система перемещений  $MN$  на поверхности земли остается той же, что и при наземной съемке с установкой градиента. Большое значение приобретает ориентировка линии  $MN$  для обеспечения правильного измерения кажущейся поляризуемости. Особенно целесообразна векторная съемка, поскольку интерпретация измерения какой-либо одной составляющей поля ВП практически ненадежна. Примером служат приведенные на рис. 105 графики  $\eta_k$ , вычисленные для продольной профилю  $x$ -составляющей поля ВП, для поперечной профилю  $y$ -составляющей поля ВП и для полной векторной съемки. В первых двух случаях графики имеют сложный вид, интенсивность и положение аномалий  $\eta_k$  не соответствуют рудным телам. Напротив, график  $\eta_k$ , вычисленный согласно векторному представлению кажущейся поляризуемости, имеет вполне закономерную и простую форму. Здесь же приведен и график  $\chi_k$  — второго векторного параметра. Переход  $\chi_k$  через ось абсцисс приурочен к главной рудной зоне, отмечаемой четким максимумом  $\eta_k$ . Над второй, маломощной рудной зоной аномалии  $\eta_k$  и  $\chi_k$  значительно слабее.

В тех случаях, когда удастся сделать заземление в непосредственной близости от исследуемого рудного тела, иногда удобно измерять по схеме потенциала. Однако при этом прослеживается лишь тело, расположенное вблизи источника тока, в то время как аномалии ВП над соседними телами оказываются слабыми. Сочетание измерений потенциала и градиента потенциала поля ВП позволяет выявить и в определенной степени дифференцировать аномалии, связанные с «близкими» и с «далекими» телами.

Методика изучения одиночной скважины по способу поверхность—скважина сводится к измерению градиента потенциала в скважине при размещении токового электрода в устье скважины (второй — на «бесконечности») или в разных направлениях на определенном расстоянии от устья. Последний способ, получивший название азимутальной съемки, позволяет оценить на-

\* Имеются опытные образцы аппаратуры, обеспечивающей запись  $\eta_k$  при непрерывном движении каротажного снаряда.

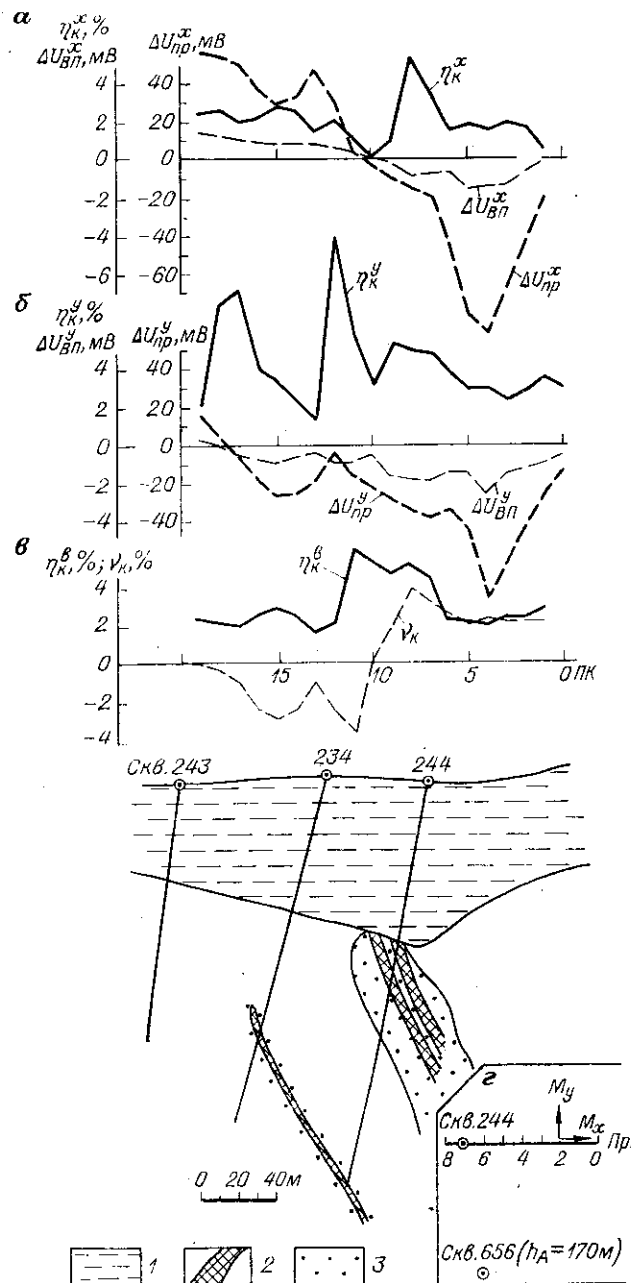


Рис. 105. Результаты векторной съемки над сульфидным месторождением в Северном Таджикистане (по А. Н. Балашеву).

Графики при измерениях с измерительной линией, ориентированной: а — вдоль профиля; б — вкост профиля; в — графики векторных параметров; г — план расположения профиля и скв. 656, в которой на глубине 170 м находился токовый электрод А (электрод В отнесен на «бесконечность»). 1 — рыхлые отложения; 2 — рудные тела; 3 — зоны сульфидной вкрапленности.

правление и расстояние от исследуемой скважины до источника аномалии [259, 268].

Одновременное использование двух скважин позволяет значительно повысить разрешающую способность метода ВП. Для упрощения измерений интерпретации получаемых данных, на взгляд автора, удобнее взамен «просвечивания», когда токовый и измерительные электроды находятся в разных скважинах, размещать измерительные электроды по одному в скважине, оставляя токовые электроды на поверхности земли или располагая их в других скважинах. В предполагаемом способе нетрудно добиться нужной взаимной ориентировки поляризующего поля и измерительной линии и тем самым значительно упростить регистрируемую картину кажущейся поляризуемости.

Например, располагая токовые электроды так, чтобы исследуемые скважины находились в средней части линии АВ, можно создать горизонтальное поляризующее поле. При параллельном спуске измерительных электродов в скважины линия MN будет параллельна приложенному полю и получаемые графики кажущейся поляризуемости — наиболее простыми из возможных. Закрепляя далее один из измерительных электродов в обнаруженной аномалии или в известном рудном «горизонте» и перемещая по другой скважине второй измерительный электрод, можно оценить залегание тела между скважинами и решить задачу корреляции «горизонтов» вкрапленных руд, встреченных одной или обеими скважинами. Разнос токовых электродов должен удовлетворять формуле (285). Меняя положение токовых электродов и соответственно ориентировку поляризующего поля, можно «почувствовать» ориентировку большой оси тела и повысить точность определения элементов его залегания.

#### Временной режим измерений

Вопрос о режиме измерений ВП рассмотрен ранее. Все измерения надо увязывать с переходной временной характеристикой ВП, соотношения с которой импульсных режимов показаны в гл. I. Там же дана взаимосвязь временных и частотных характеристик ВП.

Следует различать интегральные и дифференциальные измерения ВП. К интегральным относятся измерения с предельно большим приращением времени  $\Delta T$ , когда в поле ВП суммируется поляризация тел, существенно различающихся по присущей им постоянной времени ВП. Примером таких измерений служит отсчет  $\Delta U_{ВП}$  через очень короткое время после долгой зарядки.

Дифференциальными надо считать измерения с относительно небольшим приращением времени  $\Delta T$ , в пределах которого переходную характеристику  $F(\lg T)$  можно считать линейной по отношению к  $\lg T$ . Тогда в поле ВП максимальное отображение получают процессы с постоянной времени, лежащей в соответствующем интервале временной оси от  $T_1$  до  $T_2$ , причем для одиночного импульса  $T_1 = t$ ;  $T_2 = t + t_3$ ;  $\Delta T = t_3$ . Дифференциаль-

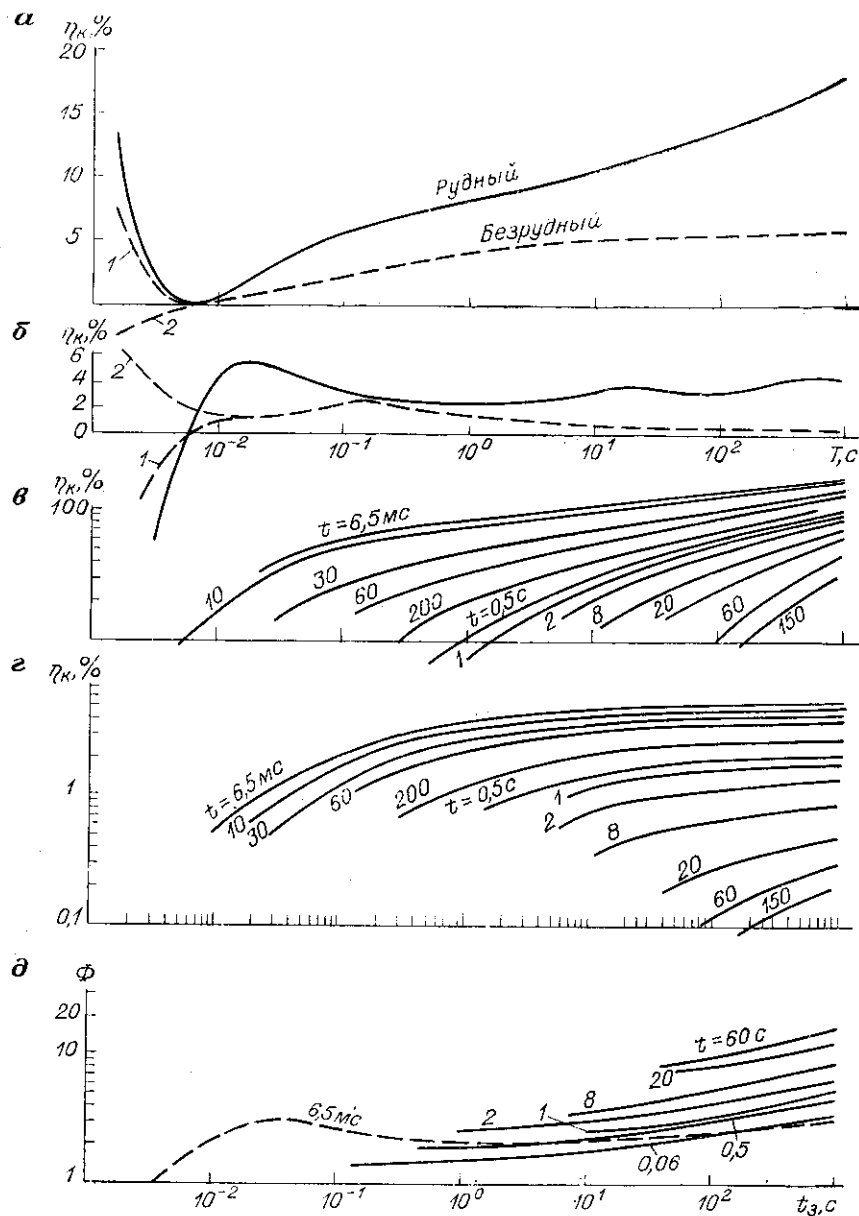


Рис. 106. Временные характеристики ВП над медноколчеданным телом Александринского месторождения и на безрудном участке вблизи месторождения (по материалам О. М. Шаповалова).

Установка среднего градиента,  $AB = 1000$  м,  $MN = 50$  м.

Временные зависимости: а — кажущейся поляризуемости  $\eta_k$  (1 — график на безрудном участке при удельном сопротивлении пород порядка десятков ом-метров; 2 — начальная ветвь графика на безрудном участке, 1 при удельном сопротивлении пород более

ными являются все измерения с относительно короткой зарядкой, а также измерения приращения  $\Delta U_{вп}$  за короткий интервал спада. Типично дифференциальными являются фазовые измерения на переменном токе. Интегральные измерения лучше всего подходят для поисковых работ, когда целесообразно выявлять все поляризуемые объекты. Для детального изучения выявленных объектов необходимы дифференциальные измерения. Чем шире диапазон времени, в котором выполнены дифференциальные измерения, тем полнее информация о процессах ВП и тем надежнее можно различить объекты.

До площадных съемок совершенно необходимо на нескольких точках в типичных условиях снять переходные характеристики ВП в большом интервале времени, чтобы по ним определить оптимальный режим последующих массовых измерений. За оптимальный можно принять весь интервал времени, в пределах которого переходную характеристику, построенную в логарифмическом масштабе времени, можно отобразить (в первом приближении) прямой линией.

Этот интервал времени, судя по имеющемуся опыту, составляет 0,1—50 с и, как правило, находится за пределами влияния индукционных процессов. Вместе с тем такой интервал охватывает время наибольшего проявления поляризации вкрапленных руд, служащих главным предметом поисков методом ВП. Измерения в указанном интервале переходной характеристики ВП, в частности, реализуются при отсчете через 0,1 с после зарядки длительностью 10—50 с. Примерно в этом интервале работают станции ВП-62, ВПС-63 и другие, разработанные в 60-х годах.

Для повышения производительности работ можно использовать ту или иную часть обсуждаемого интервала, например от 0,1 до 1 с или от 0,5 до 5 с. При этом уменьшается измеряемое значение  $\Delta U_{вп}$  и несколько ухудшается контрастность аномалий  $\eta_k$ , но на первом этапе работ методом ВП с этим часто можно мириться.

Для дифференциальных измерений лучше всего выбирать времена  $T_{ср} = \sqrt{T_1 T_2}$ , соответствующие максимумам дифференциальной поляризуемости объектов, которые надлежит выделить или различить. К примеру, О. М. Шаповалов для разделения рудовмещающих пород, серпентинитов и медноколчеданных руд на Южном Урале успешно использовал 0,016; 0,064; 0,512; 4; 32 и 256 с.

Роль режима измерений проиллюстрируем результатами исследований переходных характеристик ВП на Александринском медноколчеданном месторождении, которые выполнил О. М. Шаповалов. На рис. 106 показаны типичные временные зависимости

500 Ом·м), б — производной кажущейся поляризуемости по  $\lg T$ ; зависимость: в — кажущейся поляризуемости над рудным телом от времени зарядки при разных временах отсчета напряжения ВП после выключения тока; г — кажущейся поляризуемости на безрудном участке от времени зарядки при разных временах отсчета напряжения ВП после выключения тока; д — отношения кажущихся поляризуемостей над рудным телом и на безрудном участке от времени зарядки при разных временах отсчета напряжения ВП после выключения тока.

$\eta_k$  и дифференциальной кажущейся поляризуемости  $\tilde{\eta}_k = -d\eta_k/d\lg T$ , наблюдаемые над месторождением и на безрудных участках за его пределами. Измерения выполнены посредине между токовыми электродами, кажущееся удельное сопротивление в среднем составляло 100—200 Ом·м.

В интервале времени до 10 мс отчетливо видны индукционные процессы в земле, в силу которых над рудным телом через 7 мс наблюдается глубокий минимум на переходной характеристике. На безрудных участках, сложенных хорошо проводящими рыхлыми отложениями, начальная ветвь графика  $\eta_k (\lg T)$  сходна с полученной над рудным телом (график 1). При кажущемся удельном сопротивлении порядка 1000 Ом·м, характерном для магматических пород, минимум  $\eta_k$  смещается в область малых времен (до 1 мс). Процессы ВП ясно видны начиная с 0,01 с (график 2). На графиках  $\tilde{\eta}_k$  на безрудном участке наблюдается максимум при  $T = 0,2$  с. Над рудными телами нередко наблюдается несколько максимумов  $\eta_k$ . В приведенном примере абсциссы максимумов  $\tilde{\eta}_k$  равны 20 и 800 с.

Различия в переходных характеристиках выражаются и в том, что над рудным телом рост  $\eta_k$  продолжается в течение многих часов, а на безрудных участках практически заканчивается через несколько минут. Влияние длительности зарядки  $t_s$  на  $\eta_k$ , измеренную в тот или иной момент времени  $t$  после выключения тока, показано на рис. 106 в, г. Установление значений  $\eta_k$  происходит тем быстрее, чем меньше время  $t$ .

Зависимость отношения  $\eta_k$  над рудным телом и на безрудном участке от  $t_s$  и  $t$  показана на рис. 106, д. Отношение закономерно возрастает по мере увеличения длительности зарядки и времени отсчета после выключения тока от 1,5—2, если  $t_s < 1$  с и  $t < 0,1$  с, до 10—20, если  $t_s > 300$  с и  $t > 5$  с. При малых значениях  $t_s$  и  $t$  аномалии  $\eta_k$  могут практически отсутствовать даже над объектами, уверенно выделяемыми при использовании больших времен. По этой причине зарубежная аппаратура, выпущенная в 50-х и 60-х годах, не всегда была эффективной. В последние годы длительность зарядки в американской и канадской аппаратуре с 1—2 с увеличена до 10—15 с, а время отсчета с десятков до сотен миллисекунд. Соответственно и рабочая частота при работах на переменном токе снижена до 0,1 Гц, а в некоторых видах аппаратуры до 0,01 Гц.

Перечень и назначение разнообразных режимов тока в станции СВП-74 даны выше. Для изучения переходной характеристики более всего подходят одиночные импульсы тока или периодические импульсы с большой паузой между ними, достаточной для полного спада ВП. Те же режимы используют при изучении нелинейных процессов на постоянном токе. Разнополярные импульсы с паузой, равной длительности импульса (РПИ-2)

или меньше его, удобны для массовой съемки и изучения дифференциальной поляризуемости.

Однополярные периодические импульсы, в методе ВП впервые использованные А. Ф. Кондратенко [150], дают возможность проследивать переходную характеристику вызванной поляризации в процессе зарядки по показаниям стрелочного прибора, работающего в стробирующем режиме. Однополярные импульсы представляют собой сумму переменного прямоугольного тока с частотой, равной частоте следования импульсов, и постоянного тока, действующего в течение всего времени пропускания однополярных импульсов. Такие импульсы удобны для выявления нелинейных эффектов на переменном токе, при этом равенство амплитуд переменного и постоянного тока автоматически поддерживается с высокой точностью.

#### Обработка результатов измерений

Цикл измерений на каждой точке состоит из определений двух разностей потенциалов:  $\Delta U_{пр}$  во время пропускания тока и  $\Delta U_{ВП}$  после его выключения, а также силы тока  $I$  в линии АВ. При работе со стрелочным измерительным прибором разности потенциалов получают по шкале прибора, а при работе с осциллографом — снимают с записей на фотоленте с учетом градуировочных графиков. Силу тока определяют по показаниям амперметра.

Если снимают переходную характеристику по измерениям спада ВП, то используют одиночные импульсы тока. Значение  $\Delta U_{ВП}$  определяют как разность напряжений на измерительных электродах после выключения тока и до его включения. Это означает, что за нулевую линию принимают положение стрелки визуального прибора или запись на осциллограмме, предшествующие пропусканию тока (рис. 107). Значение  $\Delta U_{пр}$  определяют

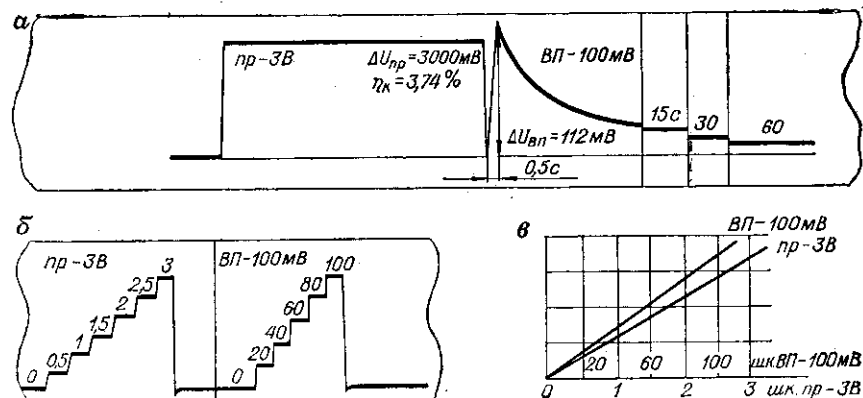


Рис. 107. Примеры осциллограмм при одиночном импульсе тока (а), градуировки шкал (б) и соответствующих им градуировочных графиков (в).

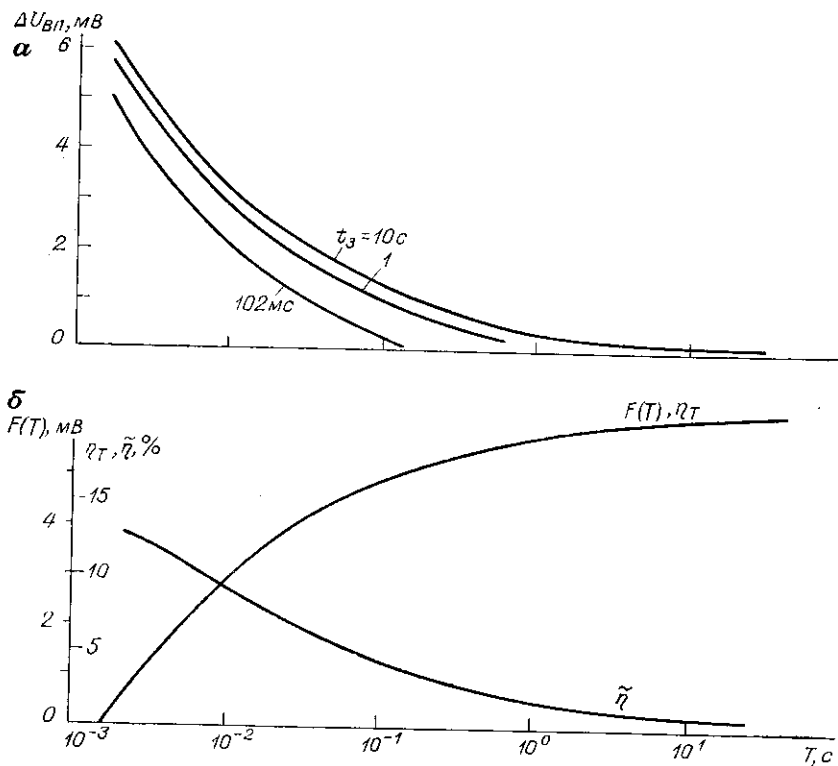


Рис. 108. Графики спада  $\Delta U_{\text{вп}}$  при разной зарядке (а) и соответствующие им переходные характеристики напряжения ВП и его производной по десятичному логарифму времени (б) для боксита.

как разность напряжений в фиксированный момент зарядки и до включения тока.

Первый момент отсчета напряжения ВП после выключения тока выбирают как ближайший к заднему фронту импульса и вместе с тем надежный в отношении качества измерений с имеющейся аппаратурой. Последующие моменты отсчета должны отстоять друг от друга на длительность зарядки  $t_z$  так, что  $t_1 = t_n$ ;  $t_2 = t_n + t_z$ ;  $t_3 = t_n + 2t_z$ , ... Отсчеты  $\Delta U_{\text{вп}}$  суммируют в соответствии с формулой (29) и строят переходную характеристику  $F(T)$  как нарастающую сумму в диапазоне времени от  $T_n = t_n$  до  $T_k = t_n + nt_z$ , где  $n$  — число интервалов  $t_z$ , укладываемых в изученную кривую спада ВП.

Вертикальный масштаб  $\Delta U_{\text{вп}}$  и  $F(T)$  один и тот же. Зная  $\Delta U_{\text{пр}}$  для фиксированного момента пропускания  $T_{\text{ф}}$ , нетрудно на вертикальной оси сделать вторую оцифровку, соответствующую временной зависимости кажущейся поляризуемости  $\eta_k(T) = F(T)/\Delta U_{\text{пр}}$ . Пример построения дан на рис. 108.

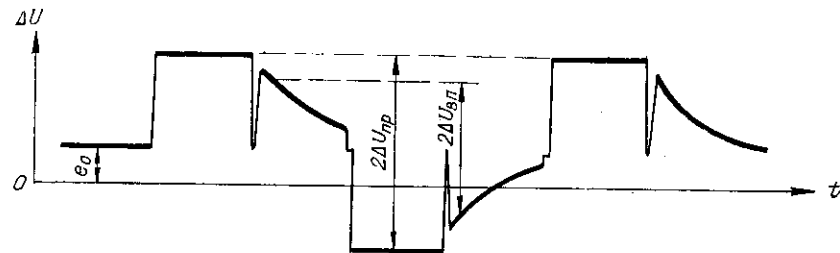


Рис. 109. Пример обработки отсчетов  $\Delta U$  при работе в режиме разнополярных импульсов тока.

Если процесс ВП линейный, сила тока постоянна и точность измерений достаточно высока, то точки  $F(T)$ , вычисленные по кривым спада для разных  $t_z$ , укладываются в единую линию. Для проверки линейности ВП относительно тока измерения выполняют при одном и при другом направлении тока и сравнивают графики  $F(T)$ . Средние значения этих графиков характеризуют линейную, разность их — нелинейную составляющую ВП.

С кривой  $\eta_k(T)$  графически снимают и строят на том же полулогарифмическом бланке  $\Delta \lg T$  при постоянном приращении  $\Delta \lg T = \lg(T_2/T_1)$ . Для большей детальности построения берут  $T_2/T_1 = 2$  или 4, но полученные значения  $\Delta \eta_k$  умножают на  $1/\lg 2 = 3,1$  или на  $1/\lg 4 = 1,55$ , чтобы в конечном итоге иметь производную по десятичному логарифму времени  $\Delta \eta_k/\lg 10 = \tilde{\eta}_k$ . Значения  $\tilde{\eta}_k$  относят к  $T_{\text{ср}} = \sqrt{T_1 T_2}$ .

Если используют разнополярные импульсы тока, то берут подряд отсчеты  $\Delta U_{\text{вп}}$  после 3—4 последовательных импульсов. Нулевой линией отсчета  $\Delta U_{\text{вп}}$  и  $\Delta U_{\text{пр}}$  может быть любое положение стрелки прибора или записи на осциллограмме, обеспечивающее регистрацию напряжений при обоих знаках импульсов с нужной чувствительностью. Отсчеты обычно содержат (помимо ВП) некоторое стороннее напряжение, например нескомпенсированную часть разности собственных потенциалов измерительных электродов  $e_0$ . Сумма отсчетов, соответствующих двум смежным импульсам тока, не содержит постоянного стороннего напряжения  $2\Delta U_{\text{вп}}$  (рис. 109). Двукратное усреднение трех смежных отсчетов позволяет избавиться от стороннего напряжения, меняющегося со временем линейно [111].

Для пояснения рассмотрим три последовательных отсчета, когда за время между ними  $\Delta t$  стороннее напряжение меняется на  $\Delta e$ . Тогда после первого импульса отсчет \*

$$\Delta U_1 = \Delta U_{\text{вп}} + e_0,$$

\* В данном случае предполагается, что до начала отсчетов прошло несколько импульсов тока и поле ВП приобрело устойчивые значения. Вопрос об установлении поля ВП в условиях разнополярных импульсов тока рассмотрел Л. М. Иоффе [111].

после второго импульса с обратным направлением тока и смены полярности включения измерительного прибора

$$\Delta U_2 = \Delta U_{\text{ВП}} - e_0 - \Delta e,$$

после третьего импульса с первоначальным направлением тока

$$\Delta U_3 = \Delta U_{\text{ВП}} + e_0 + 2 \Delta e.$$

Полусумма первого и второго отсчетов

$$\Delta U_{1,2} = \Delta U_{\text{ВП}} - \frac{1}{2} \Delta e,$$

второго и третьего отсчетов

$$\Delta U_{2,3} = \Delta U_{\text{ВП}} + \frac{1}{2} \Delta e.$$

Арифметическое среднее этих двух полусумм дает значение

$$\Delta U_{\text{ВП}} = \frac{1}{2} (\Delta U_{1,2} + \Delta U_{2,3}).$$

Если имеется четвертый отсчет, то аналогичные вычисления со вторым, третьим и четвертым отсчетами дают значение  $\Delta U_{\text{ВП}}$  во второй раз, сопоставление которого с первым служит для контроля за точностью измерений и уровнем помех. При интенсивных и нерегулярных помехах требуется большое количество отсчетов  $\Delta U_{\text{ВП}}$ , усредняя которые удается выделить  $\Delta U_{\text{ВП}}$  на фоне помех, соизмеримых и даже несколько превышающих полезный сигнал.

Для определения  $\Delta U_{\text{пр}}$  обычно достаточно двух отсчетов в конце смежных импульсов тока, поскольку влияние помех на большое значение  $\Delta U_{\text{пр}}$  гораздо меньше, чем на  $\Delta U_{\text{ВП}}$ .

При обработке осциллограмм линейные ординаты  $\Delta U_{\text{ВП}}$  и  $\Delta U_{\text{пр}}$  переводят в милливольты с помощью градуировочных графиков, которые заблаговременно строят на листе миллиметровой бумаги для каждой чувствительности измерительного канала. Градуируют путем подачи на вход измерительного прибора нескольких нарастающих эталонных напряжений и записи соответствующих сигналов на той же ленте, где записаны осциллограммы  $\Delta U_{\text{ВП}}$  и  $\Delta U_{\text{пр}}$  (рис. 107). Линейные значения  $\Delta U_{\text{ВП}}$  и  $\Delta U_{\text{пр}}$  снимают с ленты с помощью измерителя и сопоставляют с градуировочными графиками.

Длительность импульсов тока в разнополярном режиме, как правило, не более 10—30 с. Полученные значения  $\eta_k = \Delta U_{\text{ВП}} / \Delta U_{\text{пр}}$  соответствуют относительно небольшим интервалам времени, поделив их на коэффициент времени  $P$ , можно вычислить дифференциальную кажущуюся поляризуемость  $\tilde{\eta}_k = \eta_k / P$ . Значения коэффициента времени приведены в табл. 25.

Точность измерений в методе ВП определяют по воспроизводимости результатов при повторных измерениях и по сохранению закономерностей спада ВП. Точность считается удовлетворительной, если отношение разности двух измерений к их полусумме не превышает 10% [107].

ТАБЛИЦА 25

Коэффициенты времени  $P$  для импульсных режимов измерений

| $t_3/t$ | ОИ    | РПИ-2 | РПИ-1 |
|---------|-------|-------|-------|
| 1       | 0,301 | 0,222 | 0,196 |
| 2       | 0,477 | 0,383 | 0,340 |
| 3       | 0,602 | 0,501 | 0,449 |
| 5       | 0,778 | 0,671 | 0,610 |
| 10      | 1,041 | 0,929 | 0,860 |
| 20      | 1,322 | 1,207 | 1,134 |
| 30      | 1,491 | 1,375 | 1,300 |
| 50      | 1,708 | 1,591 | 1,514 |
| 100     | 2,004 | 1,887 | 1,810 |
| 200     | 2,301 | 2,186 | 2,108 |
| 300     | 2,479 | 2,361 | 2,283 |
| 500     | 2,700 | 2,582 | 2,504 |
| 1000    | 3,000 | 2,883 | 2,804 |

$t_3/t$  — отношение длительности импульса тока к моменту измерений после заданного фронта импульса; ОИ — одиночные импульсы постоянного тока; РПИ-1, РПИ-2 — разнополярные импульсы со скважностью 1 и 2.

Для проверки формы спада ВП  $\Delta U_{\text{ВП}}$ , измеренную через время  $t_1$  после выключения тока относительно нулевой линии до включения тока, сопоставляют с  $\Delta U_{\text{ВП}}$  для того же момента времени, вычисленной по формуле

$$\Delta U_{\text{ВП}}(t_1) = \frac{\Delta U_{\text{ВП}}(t_1) - \Delta U_{\text{ВП}}(t_2)}{1 - Q(t_2)} = \frac{\Delta \text{ВП}}{1 - Q(t)}, \quad (288)$$

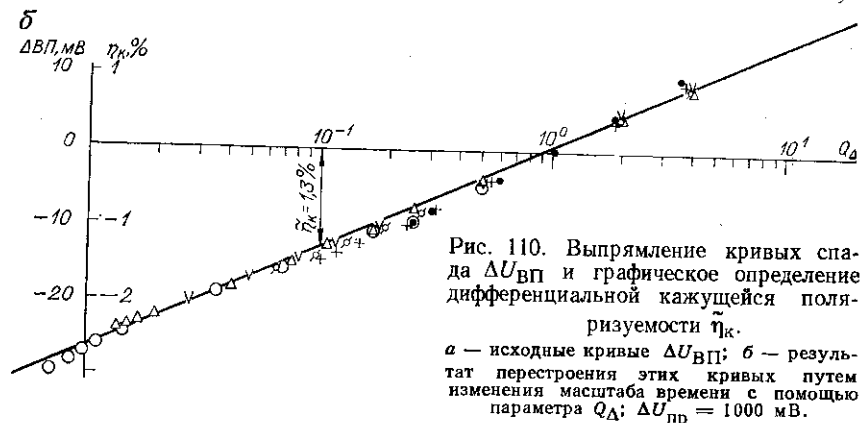
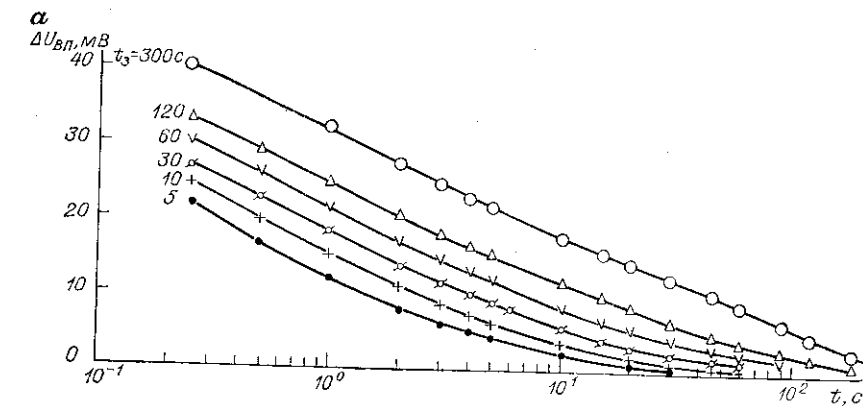
где  $\Delta \text{ВП}$  — измеренный спад напряжения ВП за интервал времени от  $t_1$  до  $t_2$ ;  $Q(t_2) = \Delta U_{\text{ВП}}(t_2) / \Delta U_{\text{ВП}}(t_1)$  — соответствующее тому же интервалу времени табличное значение, полученное при отсутствии помех.

Экспериментальные значения  $Q(t_2)$  для  $t_1 = 0,5$  с при  $t_3 = 120$  с, характеризующие средние условия в рудных районах СССР, даны ниже. Там же приведены теоретические значения  $Q(t_2)$ , соответствующие отношению коэффициентов времени для  $t_1 = 0,5$  с и переменного  $t_2$  при  $t_3 = 120$  с:  $Q(t_2) = P_2 / P_1$ , где  $P_1 = \lg(1 + t_3/t_1)$ ;  $P_2 = \lg(1 + t_3/t_2)$ ;

| $t_2$ , с            | 0,5 | 1    | 2    | 5    | 10   | 60   |
|----------------------|-----|------|------|------|------|------|
| $Q(t_2)$ , эксперим. | 1   | 0,84 | 0,73 | 0,55 | 0,44 | 0,20 |
| $Q(t_2)$ , теорет.   | 1   | 0,84 | 0,73 | 0,57 | 0,45 | 0,25 |

Совпадение экспериментальных и теоретических значений  $Q(t_2)$  указывает, что в отмеченном интервале времени обобщенная переходная характеристика ВП укладывается в линейно-логарифмическую форму. Следовательно, для каждой пары значений  $\Delta U_{\text{ВП}}$  в моменты времени  $t_1$  и  $t_2$  можно ввести коэффициент времени

$$P_{\Delta} = P_1 - P_2 = \lg \frac{1 + t_3/t_2}{1 + t_3/t_1} = \lg Q_{\Delta} \quad (289)$$



такой, что разность этих значений  $\Delta$  ВП оказывается прямо пропорциональной коэффициенту времени  $P_{\Delta}$ :

$$\Delta \text{ВП} = \Delta \tilde{U}_{\text{ВП}} P_{\Delta}, \quad (290)$$

где  $\Delta \tilde{U}_{\text{ВП}}$  — дифференциальное напряжение ВП, соответствующее на переходной характеристике 10-кратному изменению времени.

Измерения зависимости  $\Delta$  ВП от  $t_2$  означают перенос начала координат в точку спада ВП, имеющую абсциссу  $t_1$ . Они не требуют знания нулевой линии отсчета полного значения  $\Delta U_{\text{ВП}}$ . Вычисления

$$Q_{\Delta} = \frac{1 + t_3/t_2}{1 + t_3/t_1} \quad (291)$$

для известного режима измерений довольно просты. Если в качестве аргумента вместо времени  $t$  использовать  $\lg Q_{\Delta}$ , то график спада ВП преобразуется в прямую линию до тех пор, пока переходную характеристику можно аппроксимировать линейно-логарифмической функцией. Соответствующие перестроения наблюдаемых спадов ВП позволяют оценить влияние помех и графически опре-

ТАБЛИЦА 26  
Значения функции  $Q_{\Delta}$  для разных моментов времени  
 $t_1 = 1$  с

| $t_3$ | $t_2, \text{с}$ |         |        |        |         |
|-------|-----------------|---------|--------|--------|---------|
|       | 0,1             | 0,25    | 0,5    | 1      | 2       |
| 5     | 8,5             | 3,50000 | 1,8333 | 1,0000 | 0,58333 |
| 10    | 9,1818          | 3,72727 | 1,9091 | 1,0000 | 0,54545 |
| 15    | 9,4375          | 3,8125  | 1,9375 | 1,0000 | 0,53125 |
| 30    | 9,7096          | 3,9032  | 1,9677 | 1,0000 | 0,51612 |
| 60    | 9,8524          | 3,9508  | 1,9836 | 1,0000 | 0,50812 |
| 120   | 9,9256          | 3,9752  | 1,9917 | 1,0000 | 0,50413 |
| 180   | 9,9502          | 3,9834  | 1,9945 | 1,0000 | 0,50276 |
| 300   | 9,9700          | 3,9900  | 1,9967 | 1,0000 | 0,50166 |
| 600   | 9,9850          | 3,9950  | 1,9983 | 1,0000 | 0,50083 |

| $t_3$ | $t_2, \text{с}$ |         |         |          |          |
|-------|-----------------|---------|---------|----------|----------|
|       | 4               | 6       | 10      | 15       | 30       |
| 5     | 0,375           | 0,30555 | 0,2500  | 0,22221  | 0,19443  |
| 10    | 0,31818         | 0,24242 | 0,18182 | 0,15151  | 0,12121  |
| 15    | 0,29688         | 0,21875 | 0,15625 | 0,12500  | 0,093750 |
| 30    | 0,27419         | 0,19355 | 0,12903 | 0,096774 | 0,064516 |
| 60    | 0,26229         | 0,18032 | 0,11475 | 0,081967 | 0,049180 |
| 120   | 0,25620         | 0,17355 | 0,10744 | 0,074380 | 0,041322 |
| 180   | 0,25414         | 0,17127 | 0,10497 | 0,071823 | 0,038674 |
| 300   | 0,25249         | 0,16944 | 0,10299 | 0,069767 | 0,036544 |
| 600   | 0,25124         | 0,16805 | 0,10150 | 0,068219 | 0,034941 |

| $t_3$ | $t_2, \text{с}$ |          |           |           |           |          |
|-------|-----------------|----------|-----------|-----------|-----------|----------|
|       | 90              | 120      | 150       | 180       | 240       | 300      |
| 5     | 0,17591         | 0,17360  | 0,17221   | 0,17128   | 0,17013   | 0,16943  |
| 10    | 0,10101         | 0,098481 | 0,096963  | 0,095954  | 0,094690  | 0,093936 |
| 15    | 0,072912        | 0,070312 | 0,068750  | 0,067706  | 0,066406  | 0,065625 |
| 30    | 0,043009        | 0,040322 | 0,038709  | 0,037632  | 0,036290  | 0,035483 |
| 60    | 0,027321        | 0,024590 | 0,022950  | 0,021857  | 0,020491  | 0,019672 |
| 120   | 0,019283        | 0,016529 | 0,014876  | 0,0137735 | 0,012396  | 0,011570 |
| 180   | 0,016574        | 0,013812 | 0,012155  | 0,0110497 | 0,0096685 | 0,008840 |
| 300   | 0,014396        | 0,011628 | 0,0099667 | 0,0088591 | 0,0074750 | 0,006645 |
| 600   | 0,012756        | 0,009983 | 0,0083194 | 0,0072101 | 0,0058236 | 0,004992 |

делить  $\Delta \tilde{U}_{\text{ВП}}$ , деление которой на  $\Delta U_{\text{пр}}$  дает дифференциальную кажущуюся поляризуемость. Пример такой обработки кривой спада ВП показан на рис. 110. В табл. 26 приведены значения  $Q_{\Delta}$  при  $t_1 = 1$  с для ряда значений  $t_2$  и  $t_3$ , применяемых на практике.

При наземных работах по методу ВП непременно определяют кажущееся удельное сопротивление  $\rho_k$  (при скважинных — в ряде случаев приходится ограничиваться рассмотрением графиков  $\Delta U_{\text{пр}}$ ). В условиях схемы градиента когда измерения ведут не

только на том профиле, где расположены токовые электроды, но и на соседних профилях и токовые электроды могут находиться на разных профилях, вместо коэффициента установки удобнее пользоваться обратной ему величиной  $l = 1/K$ , так что

$$\rho_k = \Delta U_{пр} / (Il). \quad (292)$$

Таблицы значений  $l$  для поля точечного источника тока и разнообразных расстояний от него до измерительных электродов опубликованы [132]. Для того чтобы получить значение  $l_{AB}$ , соответствующее влиянию двух токовых электродов, достаточно из одних и тех же таблиц взять  $l$ , соответствующие каждому из электродов в отдельности, и сложить их.

В случае векторной съемки измерения ведут на двух взаимно перпендикулярных измерительных линиях, одна из которых дает  $x$ -составляющие поляризующего поля и поля ВП, а другая —  $y$ -составляющие тех же полей. Значения  $\eta_k$  и  $\nu_k$  вычисляют по формулам, представляющим эти параметры как скалярное и векторное произведения векторов указанных полей:

$$\eta_k = \frac{(E_{ВП} E_{пр})}{E_{пр}^2} = \frac{\Delta U_{x ВП} \Delta U_{x пр} + \Delta U_{y ВП} \Delta U_{y пр}}{\Delta U_{x пр}^2 + \Delta U_{y пр}^2}; \quad (293)$$

$$\nu_k = \frac{[E_{ВП} E_{пр}]}{E_{пр}^2} = \frac{\Delta U_{x ВП} \Delta U_{y пр} - \Delta U_{y ВП} \Delta U_{x пр}}{\Delta U_{x пр}^2 + \Delta U_{y пр}^2}. \quad (294)$$

Измеренные на каждой точке составляющие полей должны быть приведены к одной силе поляризующего тока.

Можно дать и векторное представление кажущегося удельного сопротивления. Сопоставляя вектор поляризующего поля с вектором нормального поля  $E_0$ , определяемого из вышеупомянутых таблиц  $l$ , имеем

$$\rho_k = \frac{(E_{пр} E_0)}{l E_0^2} = \frac{\Delta U_{x пр} l_x + \Delta U_{y пр} l_y}{l (l_x^2 + l_y^2)}; \quad (295)$$

$$\rho_v = \frac{[E_{пр} E_0]}{l E_0^2} = \frac{\Delta U_{x пр} l_y - \Delta U_{y пр} l_x}{l (l_x^2 + l_y^2)}. \quad (296)$$

При вычислении  $E_0$  удельное сопротивление среды и силу тока взяли равными единице.

Параметр  $\rho_v$  аналогичен обычному кажущемуся удельному сопротивлению  $\rho_k$ , но более чувствителен к неоднородностям пород и дает информацию, сходную с получаемой дифференциальными установками метода сопротивлений, в которых электроды располагают так, что в однородной среде измеряемая разность потенциалов равна нулю. Параметр  $\rho_v$  нормирован по полному значению нормального поля и с этой точки зрения более удобен для интерпретации, чем аномальная разность потенциалов, измеряемая с помощью дифференциальных установок.

При скважинных работах вариантами поверхность—скважина и особенно скважина—скважина в пределах линии наблюдений

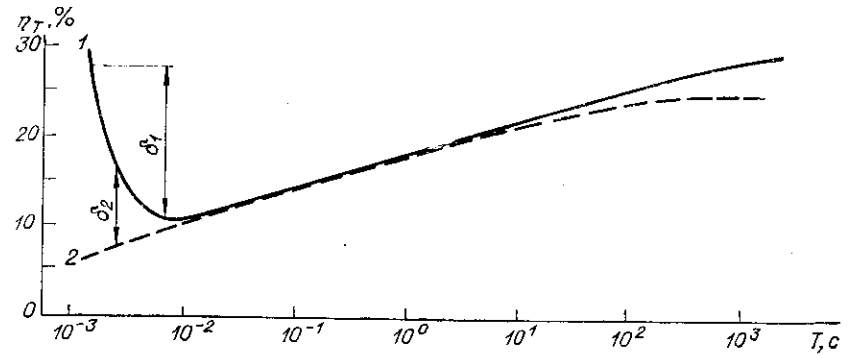


Рис. 111. Способы определения индукционного параметра  $\delta$ .  
Переходная характеристика вторичного поля: 1 — при наличии индукционного эффекта, 2 — при его отсутствии.

соотношение направлений векторов поля ВП и поляризующего поля может значительно изменяться, и интерпретация получаемой кажущейся поляризуемости  $\eta_k$  становится затруднительной. В этих условиях для определения положения поляризованного тела полезно вычислять аномальную разность потенциалов ВП, равную

$$\Delta U_{ВП ан} = (\eta_k - \eta_f) \Delta U_{пр} = \Delta U_{ВП изм} - \eta_f \Delta U_{пр}, \quad (297)$$

где  $\Delta U_{ВП изм}$ ,  $\Delta U_{пр}$  — измеренные разности потенциалов поля ВП и поляризующего поля;  $\eta_f$  — фоновая кажущаяся поляризуемость.

Практическое использование формулы (297) предполагает знание фоновой кажущейся поляризуемости, определение которой зависит от геологической обстановки. При многочисленных поляризуемых объектах в качестве фона для выделения аномалии, соответствующей одному из объектов, выступает кажущаяся поляризуемость, обусловленная совместным влиянием всех остальных объектов. Разделение наблюдаемых аномалий на составные части — одна из важнейших проблем интерпретации в сложных условиях.

При работах со станцией СВГ-74 в начальной стадии переходной характеристики электрического поля заметную роль играют индукционные процессы. Параметр этих процессов  $\delta$ , предложенный и опробованный О. М. Шаповаловым, вычисляется аналогично дифференциальной кажущейся поляризуемости (рис. 111):

$$\delta_1 = [E(T_2) - E(T_1)] / E(T_2) = \Delta E(T) / E(T_2), \quad (298)$$

где  $E(T)$  — напряжение полного поля во время пропускания тока;  $\Delta E(T) = E(T_2) - E(T_1)$  — измеренное приращение поля за интервал времени  $\Delta T = T_2 - T_1$ ;  $T_2$  и  $T_1$  — время, отсчитанное от момента включения тока, причем  $T_2 > T_1$ . Обычно берут  $T_2 \approx 10$  мс (что примерно соответствует минимуму напряжения полного поля),  $T_1 = 1; 2$  и 4 мс.

Длительность импульса тока, как правило, не меньше 50 мс и достаточна для установления индукционных процессов в реальных условиях применения СВП-74. Поэтому спад индукционного процесса после выключения тока имеет ту же форму, но знак обратный по сравнению с процессом, сопровождающим включение тока. Соответственно и параметр  $\delta_1$  можно вычислить по результатам наблюдений в паузах между импульсами тока:

$$\delta_1 = [E(t_1) - E(t_2)]/E(T_2) = \Delta E(t)/E(T_2), \quad (299)$$

где  $\Delta E(t) = E(t_1) - E(t_2)$  — приращение напряжения за интервал времени  $\Delta t = t_2 - t_1$  после выключения тока;  $t_1 = T_1$ ;  $t_2 = T_2$ ;  $t_2 > t_1$ .

Для нормирования вторичного поля по-прежнему используют напряжение  $E(T_2)$  во время пропускания тока.

Второй способ определения индукционного параметра  $\delta_2$  заключается в определении разности между наблюдаемым суммарным полем  $E(T)$  и тем полем, которое следовало бы ожидать без индукционного эффекта. В этом случае поле ВП служит фоном для выделения индукционного поля (рис. 111). Фоновое поле О. М. Шاپовалов подбирал из экспериментальных полевых переходных характеристик ВП, совпадающих в правой ветви с исследуемой кривой суммарного поля [306].

В обоих способах (особенно во втором) можно выбирать разные моменты  $T_1$  или  $t_1$  и строить по профилю несколько графиков  $\delta$  точно так же, как это часто делается в индуктивном методе переходных процессов.

# IV

## МЕТОДИКА ИСТОЛКОВАНИЯ АНОМАЛИИ ВП

### ВЫДЕЛЕНИЕ АНОМАЛИЙ КАЖУЩЕЙСЯ ПОЛЯРИЗУЕМОСТИ

#### Общие принципы

Основным критерием для выделения аномалий ВП служит превышение наблюдаемой кажущейся поляризуемости над фоном, соответствующим поляризуемости окружающих пород. Необходимое условие существования аномалий кажущейся поляризуемости — заметная избыточная поляризуемость искоемых тел.

Как показано в гл. I, поляризуемость пород, не содержащих электропроводящих минералов, при  $t = 0,5$  с и  $t_z = 2 \div 3$  мин обычно не превышает 2%. Высокая стабильность поляризуемости пород наблюдается и в полевых условиях [123, 139, 242]. Породы различного состава имеют близкие значения поляризуемости: массивные магматические и метаморфические породы, как правило, 1—2%, влажные песчано-глинистые породы 0,5—1,5%. Эти значения  $\eta_k$  служат фоновыми для выявления электронных проводников. Присутствие в породах даже бедной рассеянной вкрапленности электропроводящих минералов приводит к резкому увеличению поляризуемости\*. У рудоносных пород поляризуемость нередко достигает десятков процентов и оказывается значительно выше верхнего предела поляризуемости «пустых» пород. Порождаемые при этом аномалии  $\eta_k$  служат надежным признаком присутствия электронных проводников, как только кажущаяся поляризуемость достигает 3—4% и более.

Однако нередко случаи, когда электропроводящие минералы присутствуют не только в рудных телах, но и во вмещающих породах, образуя протяженные пиритизированные, пирротинизированные, графитизированные и тому подобные зоны. Эти зоны на фоне низкой поляризуемости «пустых» пород отмечаются соответственно протяженными аномалиями кажущейся поляризуемости,

\* Исключения из этого правила, касающиеся акцессорных включений магнетита, сульфидов и других минералов, пояснены в гл. I.

которые можно рассматривать в качестве региональных аномалий ВП, в отличие от локальных, сопутствующих рудным зонам.

В пределах одной региональной аномалии может быть множество локальных. Кроме того, аномалии могут быть многопорядковыми, когда внутри крупной аномалии первого порядка помещается меньшая по площади аномалия второго порядка, а внутри последней — аномалия третьего порядка и т. д. При этом аномалии низшего порядка служат фоном, на котором проявляются аномалии высшего порядка.

#### Региональные и локальные аномалии

Разделение аномалий на региональные и локальные, определение их порядка, в известной степени условно и зависит от объема

интерпретируемого материала, его сложности и решаемых геологических задач.

При разделении кажущейся поляризуемости на составные части следовало бы учитывать взаимодействие электрических полей рассматриваемой совокупности тел, приводящее к тому, что общее поле этих тел несколько отличается от суммы полей отдельных тел. Это взаимодействие численно приблизительно равно поляризуемости вмещающих пород [138], и при упрощенном решении задачи, приемлемом для решения практических вопросов, можно допустить, что поле ВП, создаваемое каким-либо телом, не зависит от существования других поляризованных тел в окрестности точки наблюдения.

Идею разделения аномалий на составные части поясним на следующем теоретическом примере. Примем, что шарообразное тело находится внутри мощного вертикального пласта, не перекрытого наносами, что это тело расположено достаточно далеко от границ пласта и создаваемое им поле ВП полностью затухает внутри пласта. Поместим один из токовых электродов на поверхности земли внутри пласта, а другой — во вмещающую пласт среду (рис. 112). Примем поляризуемость пласта  $\eta_1 = 11\%$ , шара —  $\eta_2 = 60\%$ , вмещающей среды —  $\eta_3 = 1\%$ , удельное сопротивление тех же объектов соответственно  $\rho_1 = 900$ ,  $\rho_2 = 300$  и  $\rho_3 = 300$  Ом·м.

Указанную структуру можно представить как сумму трех элементов, для каждого из которых известны результаты теоретических расчетов:

1) контакт двух сред, расположенный вблизи одного из токовых электродов, причем второй токовый электрод находится в «бесконечности» (на рис. 112 слева от электрода А);

2) контакт двух сред, расположенный между токовыми электродами (справа от электрода А);

3) шар в поле точечного источника тока.

В этом примере региональной можно считать аномалию, создаваемую пластом. При выделении ее за фоновую принимается поляризуемость вмещающей среды  $\eta_1$ . Аномалия, создаваемая

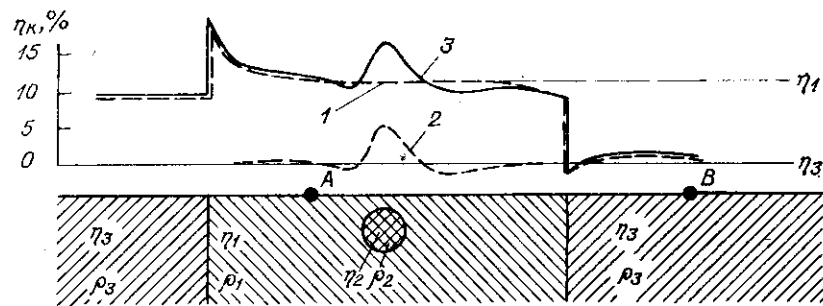


Рис. 112. Теоретические графики кажущейся поляризуемости над вертикальным пластом 1, над шаром 2 и над сложной структурой, когда шар находится внутри пласта, 3.  
 $\eta_1 = 1$ ,  $\eta_2 = 60\%$ .

шаром, выйдет как локальная на фоне кажущейся поляризуемости, соответствующей совместному влиянию пласта и вмещающей среды. Форма графиков фоновой и аномальной кажущейся поляризуемости существенно зависит от положения токовых электродов.

На практике используют два основных способа выделения локальных аномалий. Один из них, примером которого служит рис. 112, заключается в разложении графика  $\eta_k$  на составные части, соответствующие элементам реальной сложной структуры, и в последующей количественной интерпретации каждой части. Этот способ эффективен при детальном анализе полевых материалов и осуществляется путем подбора и суммирования элементов структуры, для каждого из которых графики  $\eta_k$  уже известны из теоретических расчетов или моделирования.

Второй способ заключается в статистическом выявлении общих черт графиков  $\eta_k$ , принимаемых в дальнейшем за региональный фон. Этот способ удобен для качественной интерпретации графиков  $\eta_k$ , полученных на значительной площади при многочисленных перестановках токовых электродов, и его применение может предшествовать первому способу.

Применение второго способа проиллюстрируем материалами производственных работ в Узбекистане на площади, включающей золоторудное месторождение [138]. Оруденение приурочено к брахиантиклинали, в ядре которой обнажаются известняки, а крылья сложены песчано-сланцевыми породами, перекрываемыми выше по стратиграфическому разрезу углисто-кремнистыми сланцами. Рудные тела преимущественно размещаются в песчано-сланцевой толще и контролируются зонами гидротермально измененных пород. Мелкодисперсное золото связано с арсенопиритом, объемное содержание которого в богатых рудах достигает 10—20%. Рудные тела имеют линзообразную форму, угол падения

от 40 до 90°, мощность 20–50 м и длину по простиранию 100–300 м. В каждой рудной зоне обычно имеется по несколько таких тел. Рудовмещающие породы несут рассеянную вкрапленность пирита и арсенопирита. Иногда концентрация пирита оказывается значительной, но в пиритовых телах золото не отмечено. Помимо зон сульфидной минерализации повышенной поляризуемостью обладают углисто-кремнистые сланцы, что приводит к сложной картине  $\eta_k$  в окрестности месторождения.

Работы методом ВП проведены по схеме градиента с расстояниями  $AB = 800 \div 1000$  м и  $MN = 50$  м. Расстояние между профилями при основной площадной съемке составляло 400 м, а при детализации — 200 и иногда 100 м. Токовые электроды всегда располагали на том профиле, где выполняли измерения.

Характерные графики  $\eta_k$ , полученные на одном из участков рудного поля, показаны на рис. 113. При всех перестановках токовых электродов ясно проявляется общая для всех графиков  $\eta_k$  черта: вблизи токовых электродов  $\eta_k$  понижается до 1–1,5%, а посредине линии  $AB$  повышается до 6–12%. Если все графики  $\eta_k$  наложить друг на друга, совместив оси абсцисс и точки положения токовых электродов\*, то наиболее часто встречающиеся точки графиков  $\eta_k$  образуют кривую, отражающую единую для всех профилей структуру и являющуюся фоновой при выделении локальных аномалий. Эта кривая  $\eta_k$ , показанная на рис. 113, соответствует двухслойному разрезу. Верхний слой, мощностью 30–40 м, залегает выше уровня грунтовых вод и представляет собой зону окисления, в которой сульфиды подверглись разложению. Нижний слой имеет повышенную поляризуемость в силу повсеместного присутствия вкрапленности сульфидов или графита в пределах региональной аномалии ВП, сопутствующей рудному полю в целом.

Фоновый график  $\eta_k$  проинтерпретирован с помощью теоретических палеток для двухслойного разреза при  $\rho_2 = \rho_1$ . В итоге найдено, что средняя мощность верхнего слоя составляет 40 м, а его поляризуемость — 0,5%.

Поляризуемость нижнего слоя равна 7,5%. На других участках рудного поля параметры слоев были несколько иными. Мощность верхнего слоя колебалась от 5 до 70 м, поляризуемость его — от 0,5 до 1%, поляризуемость нижнего слоя — от 7 до 10%. Отмечено закономерное возрастание поляризуемости от периферии к центру рудного поля.

Локальные аномалии выделены путем сопоставления фоновых графиков с каждым из наблюдаемых и построения разностного графика  $\eta_{ан}$ . В качестве примера на рис. 114 приведены графики  $\eta_{ан}$ , полученные при разном положении токовых электродов.

\* В качестве основного использован разнос  $AB = 800$  м. Графики, соответствующие большему разносу, при отыскании фонового разрыва делили пополам и концы их накладывали друг на друга.

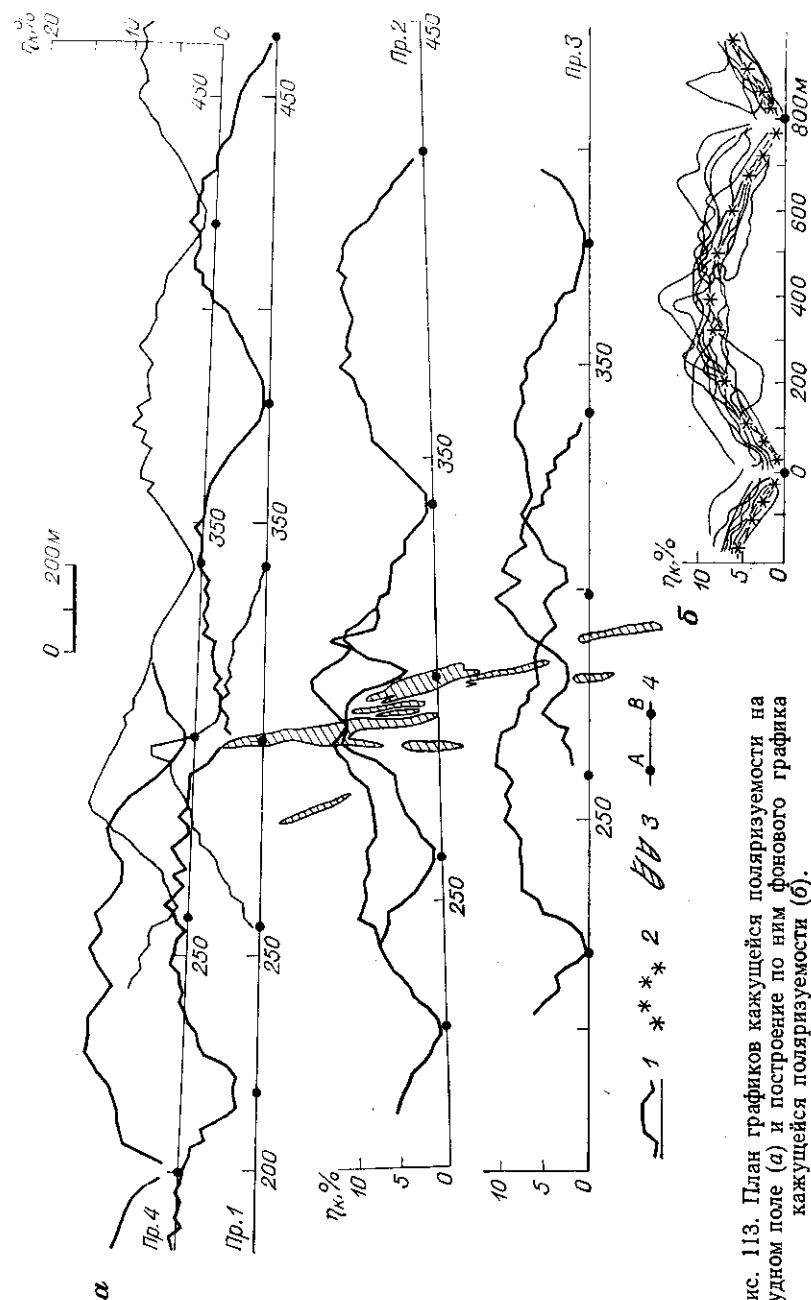


Рис. 113. План графиков кажущейся поляризуемости на рудном поле (а) и построение по ним фонового графика кажущейся поляризуемости (б).

1 — наблюдаемые графики  $\eta_k$ ; 2 — точки теоретического графика  $\eta_k$ , соответствующего двухслойной структуре при  $AB = 800$  м,  $H_1 = 40$  м,  $\eta_1 = 0,5\%$ ,  $\eta_2 = 7,5\%$ ; 3 — проекции рудных тел на поверхность земли; 4 — места установки токовых электродов.

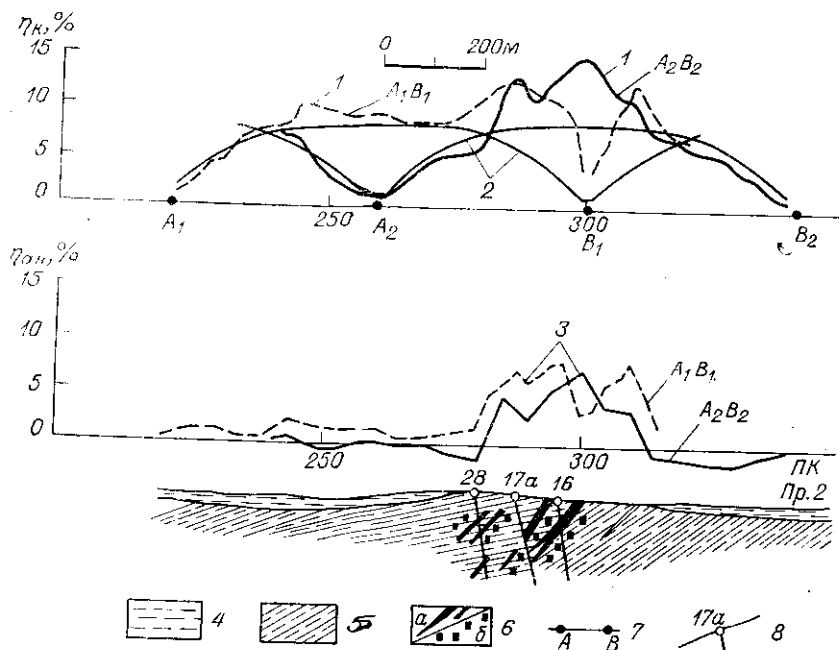


Рис. 114. Пример выделения локальных аномалий ВП.

Графики  $\eta_k$ : 1 — наблюдаемые для двух положений токовых электродов  $A_1B_1$  и  $A_2B_2$ , 2 — фоновые, 3 — аномальные; 4 — четвертичные отложения; 5 — кремнисто-хлоритовые сланцы; 6 — рудные тела (а) и зоны интенсивной сульфидной минерализации (б); 7 — местоположение стоянок токовых электродов; 8 — скважины и их номер.

дов. Их интерпретация проведена с помощью способов, перечисленных ниже. Здесь уместно кратко отметить, что на графиках локальных аномалий четко проявляются ширина рудной зоны (ПК 280—ПК 310), сложность ее внутреннего строения (не менее трех тел) и общее крутое падение.

При интерпретации данных метода ВП важную роль играют графики  $\rho_k$ , к которым применимы те же принципы классификации, что и к графикам  $\eta_k$ . Правда, в обстановке резко неоднородных по удельному сопротивлению пород количественная интерпретация графиков  $\rho_k$  практически невозможна, но даже их качественная интерпретация дает ценную информацию. В условиях рассматриваемого месторождения золотосодержащие зоны представляют собой гидротермально измененные породы, подвергнутые интенсивному окварцеванию, отмечаемые повышенными значениями  $\rho_k$ . Напротив, перитизированные и углисто-кремнистые сланцы, обладающие высокой поляризуемостью, характеризуются низкими значениями  $\rho_k$ . Благодаря этому удается различить аномалии ВП над рудными зонами и над безрудными сланцами. По этому принципу были классифицированы аномалии ВП на Пр. 3 в районе ПК 250—ПК 280 и ПК 290—ПК 310

(рис. 113). В первом районе были предсказаны и затем вскрыты буровой скважиной безрудные сланцы. Во втором районе, в согласии с данными метода вызванной поляризации, все три пробуренные скважины встретили золотосульфидные тела.

#### Специфика скважинных аномалий

За исключением площадных съемок на территориях платформ, когда повсеместно используется способ скважина — поверхность, понятие региональных аномалий в применении к анализу скважинных измерений теряет смысл. Но появляется проблема разделения аномалий, вызванных телами, пересеченными скважинами и потому доступными для каротажных исследований, и телами, находящимися в околоскважинном пространстве. Проблема усложняется из-за того, что нередко исследования проводят в одиночных скважинах и приходится довольствоваться измерением единственной составляющей поля ВП, параллельной скважине.

При работах способом поверхность—скважина в качестве фонового чаще всего используют график  $\eta_k$ , полученный с каротажным зондом. Если поляризуемость пород, пересеченных скважиной, меняется в небольших пределах, то фон относительно стабилен и выделение аномалий, порождаемых находящимися поблизости от скважины телами, удобно в практическом отношении и правомерно в теоретическом. Аномалии кажущейся поляризуемости устанавливают по разности значений  $\eta_k$ , полученных при размещении токового электрода на поверхности земли и при каротажных измерениях. Признаком рудного объекта в околоскважинном пространстве служит положительный знак этой разности.

Если скважина пересекла рудную зону и мощность зоны превышает размер применяемого каротажного зонда, то соотношение  $\eta_k$  в том и другом случае указывает на протяженность зоны в направлении, перпендикулярном к скважине. Такую оценку можно сделать по следующей формуле, получаемой из формулы (244) с учетом, что  $G \approx \gamma/(1,5\delta)$ :

$$\gamma \approx (1,5\delta\rho_2/\rho_1)[(\eta_k - \eta_n)/(\eta_2 - \eta_k)], \quad (300)$$

где протяженность зоны:  $\gamma$  — вкrest скважины, уподобляемая большой оси сплюснутого сфероида,  $\delta$  — вдоль скважины.

По каротажным данным определяют  $\delta$ ,  $\rho_1$ ,  $\rho_2$ ,  $\eta_1$  и  $\eta_2$ ;  $\eta_k$  соответствует измерениям внутри зоны при расположении токового электрода на поверхности земли или на забое скважины.

При работах с азимутальной установкой в качестве фоновой выступает кажущаяся поляризуемость, измеренная при расположении токового электрода в устье исследуемой скважины. Такой график фоновой кажущейся поляризуемости учитывает влияние рыхлых отложений, отсутствующее при измерениях с каротажным зондом.

Как отмечалось при обсуждении теоретических расчетов, на результаты измерений с потенциал-установкой в большей мере, чем с градиент-установкой, влияют электрические свойства тела, в которое помещен токовый электрод. Поэтому при работах способами скважина—поверхность и особенно скважина—скважина в качестве фоновой  $\eta_k$  для выделения тел, находящихся в стороне от тела, в которое помещен токовый электрод, можно использовать кажущуюся поляризуемость для потенциал-установки. При этом можно пользоваться как непосредственными измерениями потенциалов поля ВП и поляризуемого поля, так и их вычислениями по наблюдениям градиента полей. Графики  $\eta_k$  для потенциал-установки характеризуют пространственное положение тела, в которое помещен токовый электрод.

В большинстве случаев интерпретацию проводят, анализируя аномальную кажущуюся поляризуемость. Но в трудных условиях, когда измеряют составляющую поля ВП, не параллельную поляризуемому полю, целесообразно по формуле (297) вычислять аномальную разность потенциалов ВП или даже, интегрируя последнюю, аномальный потенциал ВП. При этом надо иметь в виду, что правильно интегрировать можно лишь при равенстве нулю аномальной разности потенциалов по меньшей мере с той стороны линии наблюдений, с которой начинается интегрирование. Если фоновая  $\eta_f$  выбрана верно, то площади, заключенные между положительными и отрицательными участками графика аномальной разности потенциалов ВП, примерно равны друг другу на линии наблюдений, проходящей вдоль оси симметрии поляризованного тела. Вычислять аномальный потенциал необходимо, когда встречаются разрывы и уход в «бесконечность» графиков кажущейся поляризуемости для градиент-установки, что часто наблюдается при использовании способа скважина—скважина. По знаку аномального потенциала и положению экстремальных точек поляризованный объект оценивается относительно просто.

### ОПРЕДЕЛЕНИЕ ФОРМЫ И ГОРИЗОНТАЛЬНЫХ РАЗМЕРОВ ПОЛЯРИЗУЕМЫХ ТЕЛ

В теории электроразведки обычно порознь рассматриваются горизонтальнослоистые структуры, характерные для условий нефтяных и газовых месторождений [82, 160], и линзообразные, пластообразные и прочие «локальные» тела, имитирующие форму рудных залежей [99, 160, 320]. Для изучения первых предназначено главным образом вертикальное зондирование, для изучения вторых — профилирование. Эти общие принципы справедливы также в отношении метода ВП. Но в методе ВП гораздо чаще, чем в других методах, используют установку градиента с неподвиж-

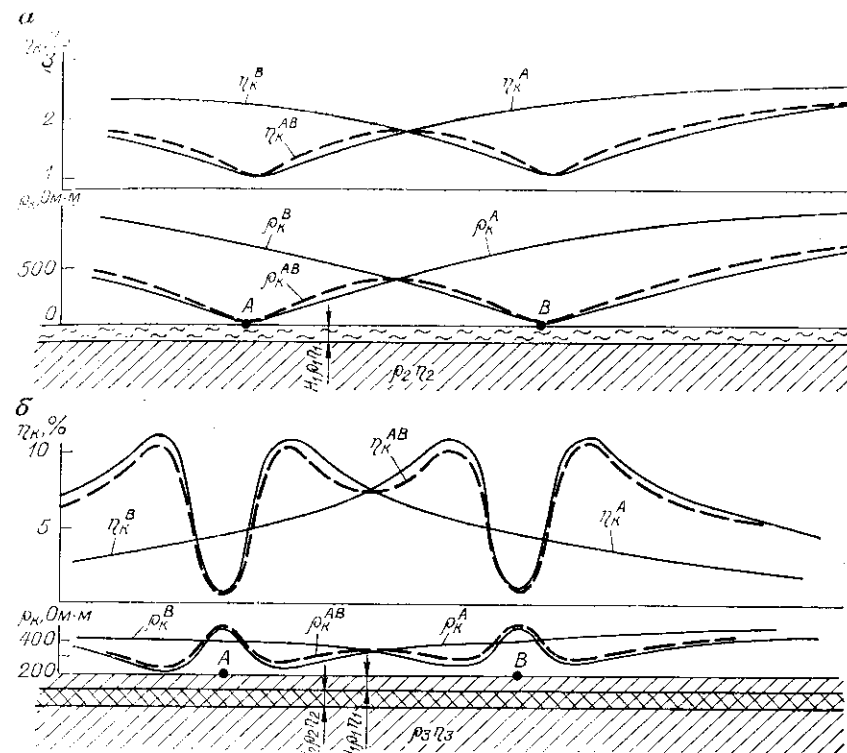


Рис. 115. Теоретические графики  $\eta_k$  и  $\rho_k$  над горизонтальнослоистой структурой, соответствующие электродам  $A$  и  $B$ , взятым порознь (сплошные линии) и вместе (штриховые линии).

$a$  — двухслойная среда,  $\eta_1 = 1\%$ ,  $\rho_1 = 50$  Ом·м,  $\rho_2 = 1950$  Ом·м,  $\eta_2 = 5\%$ ,  $AB = 20H_1$ ;  $b$  — трехслойная среда,  $\eta_1 = 1\%$ ,  $\rho_1 = \rho_2 = 500$  Ом·м,  $\eta_3 = 20\%$ ,  $\rho_3 = 125$  Ом·м,  $AB = 20H_1$ ,  $H_2 = H_1$ .

ными токовыми электродами, которая объединяет в себе свойства зондирования и профилирования.

В обстановке горизонтальнослоистых структур, однородных в горизонтальном направлении, значения  $\rho_k$  и  $\eta_k$  зависят только от расстояния между электродами. При перемещении всех электродов в пределах таких структур и сохранении расстояния между электродами  $\rho_k$  и  $\eta_k$  остаются неизменными. Воспроизводимость формы графиков  $\rho_k$  и  $\eta_k$  при перемещении токовых электродов служит отличительной особенностью горизонтальнослоистых структур (рис. 115).

Напротив, форма графиков, сопутствующих локальным телам, существенно зависит от положения токовых электродов. В качестве примеров могут служить графики для шарообразных, сфероподальных и пластообразных тел, приведенные на рис. 50, 65, 82. Максимум аномалии при изменении положения токовых электро-

дов смещается от эпицентра локального тела в ту или иную сторону на расстояние, достигающее его глубины.

Горизонтальные размеры локальных тел удобно определять по графикам  $\eta_k$ , соответствующим положению тел посередине  $AB$ , т. е. измерениям срединного градиента. Над границами тел отмечаются перегибы графиков  $\eta_k$ , а если ширина тела превышает глубину его залегания, то ширина тела просто равна ширине аномалии (рис. 61, 64). Надо, однако, отметить, что такое истолкование графиков правильно для профилей, пересекающих границы тела. Если профиль проходит вне проекции тела вдоль его границы, то аномалия затухает и расширяется по мере удаления от тела (рис. 81). Поэтому для точного установления контура тела необходимо иметь профили, проходящие над ним в разных направлениях. Иллюстрацией служит рис. 116, на котором дан план графиков  $\eta_k$  над Маднеульскими месторождениями в Грузии. Границы аномалии ВП хорошо согласуются с контурами медноколчеданного и барито-полиметаллического месторождений; аномалией ВП прослеживается также зона интенсивно пиритизированных вторичных кварцитов, примыкающая к медноколчеданному месторождению.

Размеры крупных рудных зон, протяженность которых значительно больше применяемого разброса  $AB$ , можно оценить при нескольких перестановках токовых электродов. Над каждой границей тела, оказывающейся между токовыми электродами, наблюдается ступенеобразное изменение  $\eta_k$ , резкость которого определяется избыточной поляризуемостью и глубиной тела. Примерами служат теоретические графики на рис. 71 и наблюдаемые на рис. 72 и 117. На рис. 117 показано поведение аномалии ВП в районе контакта толщи песчано-сланцевых и вулканогенных пород, несущих сульфидную минерализацию, с «пустыми» известняками, отличающимися низкой поляризуемостью и высоким удельным сопротивлением.

Если граница тела находится вблизи одного из токовых электродов и значительно удалена от второго, то четкость проявления границы на графике  $\eta_k$  хуже, чем в случае срединного градиента (рис. 72). При детальном оконтуривании тела, чтобы предельно точно установить его границы, целесообразно, поместив один из токовых электродов над серединой тела, выполнять радиальные измерения, помещая второй электрод на каждом из «лучей» за пределами контура тела.

Приемы истолкования графиков  $\eta_k$  профилирования изложены в гл. II. Напомним лишь, что принципы истолкования графиков  $\eta_k$  те же, что для графиков  $\rho_k$  над плохо проводящими телами. Горизонтальные размеры тел можно определять уверенно, если они превышают глубину залегания тел. В ином случае удастся проследить только ось аномалии ВП, характеризующую простирание поляризующегося тела, а также устанавливать направление падения тела.

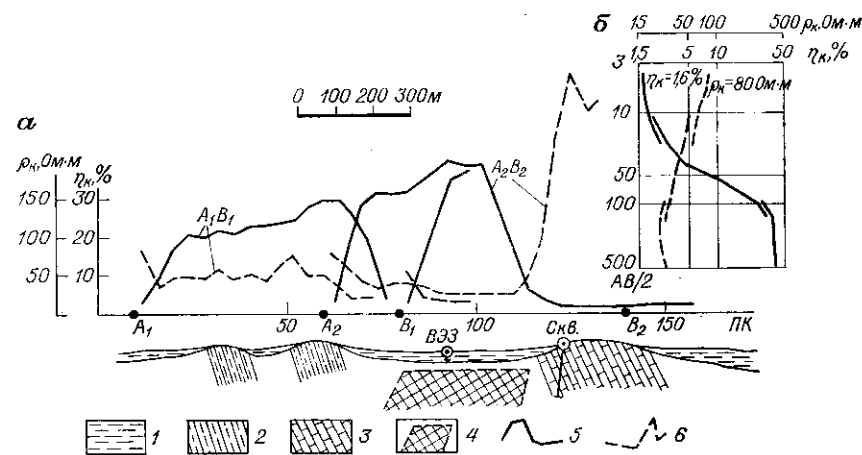
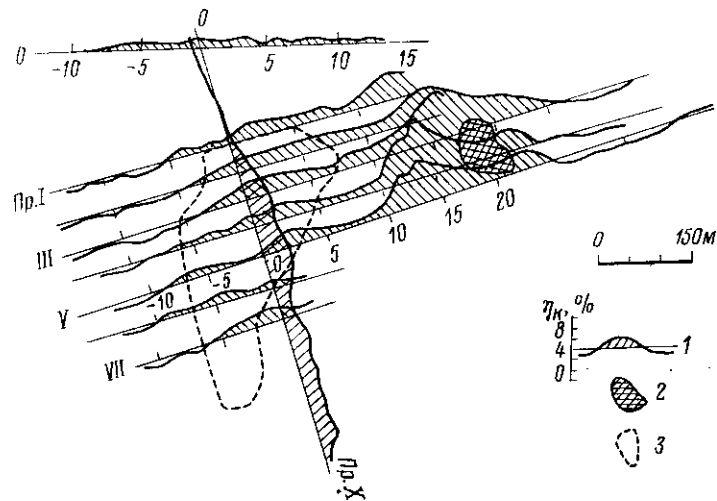


Рис. 116. План графиков  $\eta_k$  срединного градиента над сульфидными месторождениями.

1 — графики  $\eta_k$ ; 2 — выходы баритовых руд; 3 — контур медноколчеданного месторождения.

Рис. 117. Графики  $\eta_k$  и  $\rho_k$  для установок градиента (а) и симметричного вертикального зондирования (б) на поисковом участке в Западном Узбекистане (по И. И. Попову).

1 — четвертичные отложения; 2 — песчано-сланцевые и вулканогенные породы; 3 — известняки; 4 — предполагаемая рудная зона; 5 — графики  $\eta_k$ ; 6 — графики  $\rho_k$ .

## ОПРЕДЕЛЕНИЕ ГЛУБИНЫ ЗАЛЕГАНИЯ ТЕЛ

Ранее описаны способы определения глубины и мощности горизонтальных слоев по графикам  $\eta_k$  вертикального зондирования с помощью теоретических палеток.

Для рудных тел, имеющих сложную форму, создать достаточный набор теоретических графиков очень трудно. Однако опыт полевых работ показывает, что можно успешно использовать способ интерпретации по точке перегиба графика  $\eta_k$ , не прибегая к палеткам. Этот способ, обоснованный в гл. II, не дает высокой точности, но зато универсален и предельно прост.

На рис. 118 приведены графики  $\eta_k$  и  $\rho_k$  крестового зондирования с четырехэлектродной симметричной установкой в центре медноколчеданного месторождения (план графиков  $\eta_k$  срединного градиента см. на рис. 116). Перегиб графика  $\eta_k$  наблюдается при разnose  $AB/2$ , примерно равном глубине верхней кромки тела вкрапленных медных руд (около 35 м). На графиках  $\rho_k$  вкрапленные руды не проявляются.

Еще несколько примеров зондирования дано на рис. 119. На них видно, что если  $\rho_k$  возрастает с увеличением  $AB/2$  (за счет высокой электрической проводимости верхнего слоя), то перегиб на графике  $\eta_k$  происходит при разnose, несколько превышающем глубину верхней кромки тела (рис. 119, а, б, в). Если же тело обладает низким удельным сопротивлением и над ним при соответствующем разnose электродов наблюдается минимум  $\rho_k$ , то перегиб  $\eta_k$  хорошо согласуется с глубиной тела (рис. 119, г). Учитывая эти закономерности, интерпретаторы достигают удовлетворительной точности определения глубины тел. Те же способы используют при оценке глубины залегания тел по графикам  $\eta_k$ , полученным с установкой градиента, когда токовый электрод, вблизи которого ведутся измерения, помещают над исследуемым телом. До тех пор пока измерительные электроды, удаляясь от токового, остаются в пределах горизонтального контура тела, графики  $\eta_k$  аналогичны получаемым при обычном зондировании над двухслойной горизонтальной структурой. Для истолкования этих графиков можно использовать и палетки теоретических графиков зондирования, и способ определения глубины тела по точке перегиба.

Над зоной сульфидной минерализации, горизонтальная протяженность которой больше удвоенной глубины верхней кромки зоны, графики  $\eta_k$  и  $\rho_k$  для установки градиента и для симметричной четырехэлектродной установки зондирования должны иметь, с теоретической точки зрения, одинаковую форму. Сходство графиков наблюдается и на практике (рис. 120). Небольшое различие графиков (в зависимости от азимута движения измерительных электродов относительно неподвижного токового) объясняется изменением мощности наносов.

Над хорошо проводящими телами, имеющими вытянутую форму и относительно небольшую горизонтальную мощность, интенсив-

Рис. 118. Графики  $\eta_k$  и  $\rho_k$  крестового вертикального зондирования над медноколчеданным месторождением.

Центр ВЭЗ находится на ПК 0 Пр. III. Разносы электродов ориентированы по Пр. III (а) и вкрест ему (б).

1 — рыхлые отложения; 2 — безрудные породы; 3 — вкрапленные руды.

ность аномалий  $\eta_k$  и  $\rho_k$  зависит от ориентировки линии АВ относительно простирания тел. Различаются и графики при перемещении измерительных электродов вдоль простирания тела и вкрест ему, если источник тока помещен над телом.

В гл. II показано, что в случае изометричных тел для установки градиента расстояние от токового электрода до максимума равно расстоянию до центра тела (рис. 51). Отсюда следует, что если токовый электрод поместить над центром изометричного тела, положение эпицентра которого можно установить по данным срединного градиента, то глубина центра тела равна расстоянию между токовым электродом и максимумом  $\eta_k$ .

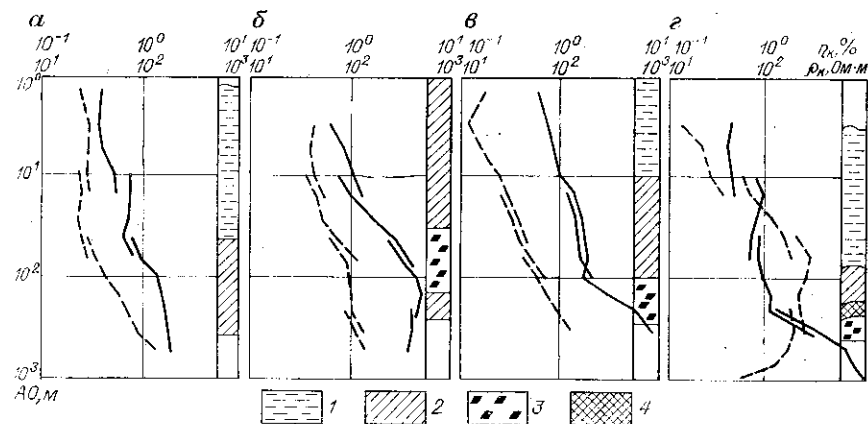
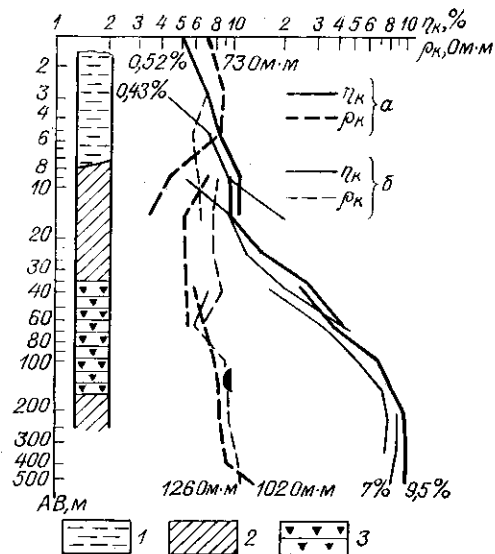


Рис. 119. Графики  $\eta_k$  (сплошные линии) и  $\rho_k$  (штриховые линии) вертикальных зондирований:

а — на безрудном участке на Алтае; б — над вкрапленными медноколчеданными рудами в Грузии; в — над вкрапленными медноколчеданными рудами на Урале; г — над богатыми медно-никелевыми рудами в Норильском районе.  
1 — рыхлые отложения; 2 — безрудные породы; 3 — вкрапленные сульфидные руды; 4 — прожилково-вкрапленные сульфидные руды.

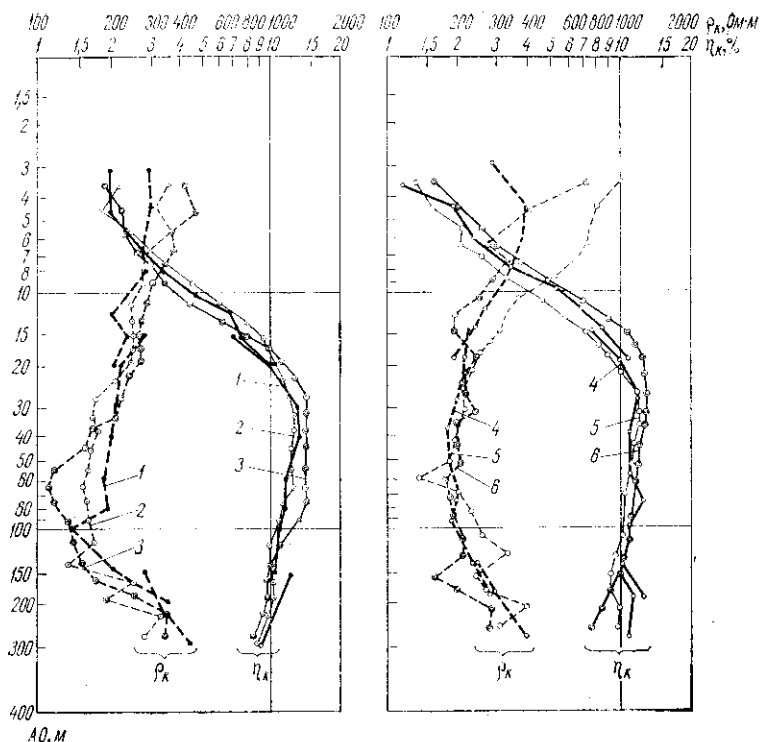


Рис. 120. Графики  $\eta_k$  и  $\rho_k$  вертикальных зондирований с разными установками над центром протяженной рудной зоны (по материалам Приморской геофизической экспедиции).

1 — симметричная четырехэлектродная установка, разносы электродов ориентированы по направлению запад—восток; трехэлектродная градиент-установка, измерительные электроды расположены: 2 — к востоку от неподвижного токового электрода (второй токовый электрод отнесен на «бесконечность»), 3 — к западу от токового, 4 — к югу от токового, 5 — к северу от токового; 6 — симметричная четырехэлектродная установка, разносы электродов ориентированы по направлению север—юг.

В случае крутопадающих тел, имеющих большую протяженность по падению, расстояние между токовым электродом, помещенным над телом, и максимумом  $\eta_k$  меньше глубины центра тела, но больше глубины верхней кромки тела. Смещение максимума  $\eta_k$  тем больше, чем больше протяженность тела по падению. По этому признаку можно различать тела, прослеживающиеся на большую глубину и выклинивающиеся недалеко от поверхности земли (рис. 63, 64).

В случае горизонтальных и пологозалегающих тел, имеющих относительно небольшую вертикальную мощность, расстояние между токовым электродом и максимумом  $\eta_k$  определяется главным образом горизонтальной протяженностью тела и соответственно превышает глубину залегания центра тела (рис. 65).

Влияние верхнего слоя хорошо проводящих пород выражается в некотором увеличении расстояния между токовым электродом и максимумом  $\eta_k$  по сравнению с вышеописанным и в соответствующем завышении определяемой глубины залегания тела (гл. II).

## ОПРЕДЕЛЕНИЕ ПАДЕНИЯ И ДРУГИХ ЭЛЕМЕНТОВ ЗАЛЕГАНИЯ ТЕЛ

Над наклонными телами, помещенными в середину линии АВ, графики  $\eta_k$  не симметричны: более глубокий минимум и крутой подъем наблюдаются со стороны «лежащего» бока тела, а максимум  $\eta_k$  несколько смещен от «головы» тела по падению (рис. 62, 65). Эти признаки следует использовать при оценке падения тела. Однако несимметричность графиков возникает и за счет несимметричного положения тела относительно токовых электродов: более крутая ветвь находится со стороны ближнего электрода (рис. 50, 82). Вследствие этого особенно в обстановке сложных рудных зон, состоящих из многих рудных тел, определение падения тел по графикам  $\eta_k$  срединного градиента оказывается ненадежным.

Надежнее определять падение тела по графикам  $\eta_k$ , когда токовый электрод находится над телом. При этом проще всего помещать электрод в центр аномалии  $\eta_k$ , обнаруженной при расположении тела в средней части линии АВ. Тогда ветви графиков  $\eta_k$  по обе стороны от токового электрода симметричны, если тело горизонтальное или вертикальное. Ветви  $\eta_k$  тем сильнее различаются, чем ближе угол падения тела к  $45^\circ$ . Большой максимум расположен со стороны лежащего бока тела, меньший — со стороны висячего бока. Максимум, находящийся со стороны падения тела, более пологий и широкий (рис. 65).

Направление падения рудных тел особенно четко проявляется при сопоставлении графиков  $\eta_k$ , полученных при расположении токового электрода с разных сторон относительно «головы» тела (на большой продольной и на малой поперечной оси эллипсоида, аппроксимирующего форму тела). Для тел, обладающих большей электрической проводимостью, чем вмещающие породы, аномалия  $\eta_k$  наибольшая, если токовый электрод расположен близ «головы» тела со стороны его лежащего бока, т. е. на большой оси (рис. 121). В случае плохо проводящих тел, напротив, наибольшую аномалию  $\eta_k$  следует ожидать при расположении токового электрода над телом со стороны его падения, т. е. на малой оси.

Аналогичным образом оценивают и направление скатывания тела вдоль его простираия. При токовом электроде, расположенном над центром тела, значения  $\eta_k$  относительно меньше, когда измерительные электроды расположены со стороны скатывания тела.

Протяженность тела в глубину можно оценить, во-первых, по соотношению минимумов и максимумов  $\eta_k$ , наблюдаемых при расположении тела в середине АВ, во-вторых, по соотношению гра-

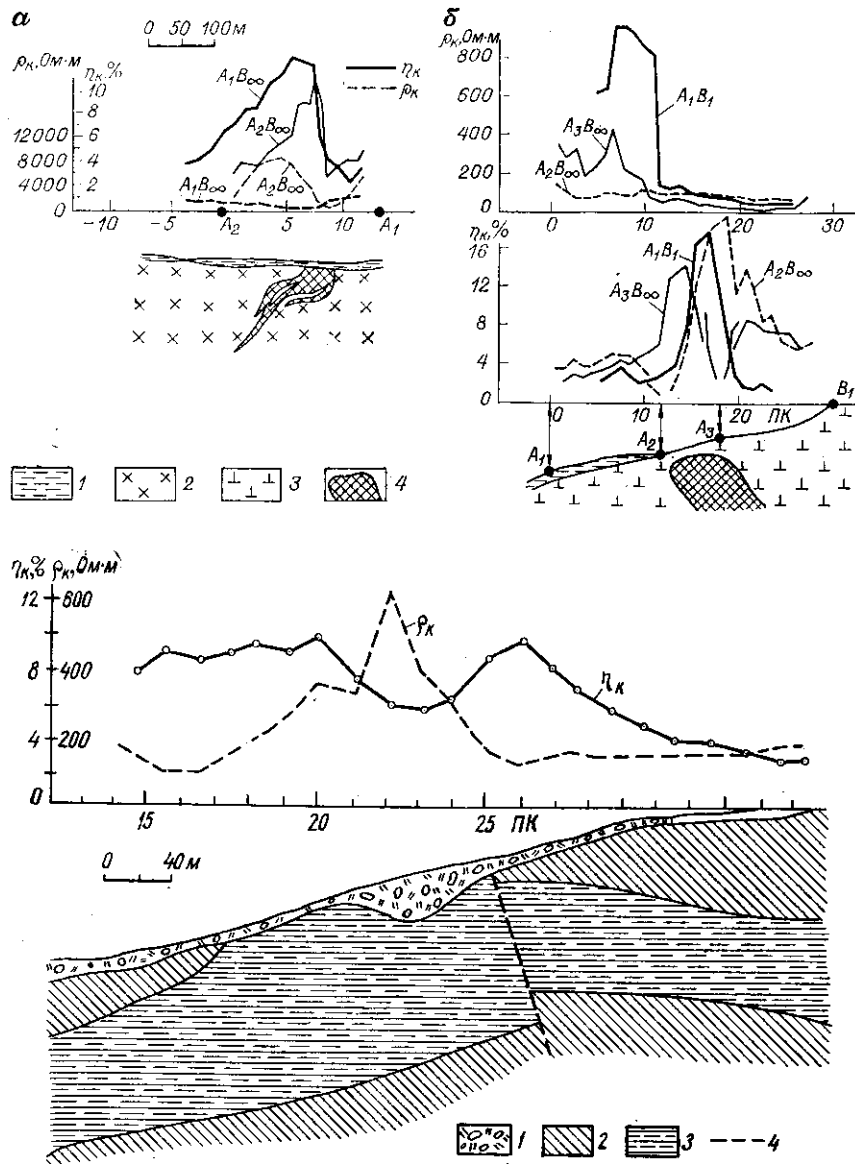


Рис. 121. Графики  $\eta_k$  и  $\rho_k$  над наклонно залегающими рудными телами при разном положении токовых электродов  $A$  и  $B$ .

$a$  — на Кольском полуострове;  $б$  — в Армении.  
1 — рыхлые отложения; 2 — диориты; 3 — дуниты; 4 — рудные тела.

Рис. 122. Графики  $\eta_k$  и  $\rho_k$  над зоной сульфидной минерализации при резком изменении мощности покрова рыхлых отложений.

1 — рыхлые отложения; 2 — кислые эффузивы и их туфы; 3 — пиритизированные вторичные кварциты; 4 — тектоническое нарушение.

фигов  $\eta_k$ , полученных в схеме срединного градиента и при расположении токового электрода над телом (в центре аномалии срединного градиента). Четкие минимумы, вплоть до отрицательных значений  $\eta_k$ , расположенные по обе стороны от максимума, служат признаком тела, имеющего относительно небольшую вертикальную протяженность (рис. 49, 61, 64, 74, 79—82). Одиночный минимум, сопряженный с максимумом  $\eta_k$ , располагается за «головой» наклонно залегающего тела там, где вертикальная мощность тела относительно мала. Чем меньше глубина нижней кромки тела, тем резче минимум  $\eta_k$ .

При расположении токового электрода над телом, имеющим большую протяженность в глубину, высокие значения  $\eta_k$  обнаруживаются далеко за пределами горизонтального контура «головы» тела по его падению. Над телом, имеющим небольшую вертикальную мощность, ширина аномалии  $\eta_k$  в случаях срединного градиента и расположения электрода над телом оказывается примерно одинаковой и равной его горизонтальной протяженности (рис. 63, 64). Мощность сфероидального тела, пересеченного линией наблюдений, можно вычислить по формуле (300).

Кстати, формула (300) пригодна для оценки роли наносов, имеющих форму, сходную с полусфероидом. При этом, ввиду низкой поляризуемости наносов, избыточная поляризуемость тела и  $\eta_{ac}$  оказываются отрицательными, так что тело наносов отмечается понижением  $\eta_k$  на некотором фоне, характеризующем поляризуемость коренных пород. Примером такой роли наносов служат графики на рис. 122, полученные над широкой зоной сульфидной минерализации вблизи выемки, заполненной делювиальными отложениями.

## ОПРЕДЕЛЕНИЕ ПОЛОЖЕНИЯ ТЕЛ В ОКОЛОСКВАЖИННОМ ПРОСТРАНСТВЕ

Истолкование графиков  $\eta_k$ , полученных при наблюдениях в скважине, в которой размещены токовый и измерительные электроды (варианты поверхность—скважина и каротажный), во многом аналогично описанному выше. Только роль «горизонтального размера» играет протяженность тела вдоль скважины, «глубины» — расстояние тела от исследуемой скважины, «падения» — угол между осью тела и скважиной.

Специфика скважинных наблюдений заключается, во-первых, в необходимости определения направления от исследуемой скважины к телу, создавшему аномалию ВП, во-вторых, в возможности такого расположения токового и измерительных электродов, при котором тело оказывается расположенным между ними. Первая особенность представляет собой требующую решения задачу, а вторая — эффективный путь решения задачи.

В применении к телам удлиненной формы (линзообразной, веретенообразной и т. п.) можно сформулировать простой закон:

аномальный потенциал ВП имеет отрицательный знак, если тело находится между источником поляризующего тела и измерительным электродом. В большинстве случаев этот закон распространяется и на аномальный градиент потенциала ВП. Обнаружение отрицательной аномалии кажущейся поляризуемости, соответствующей измерениям потенциалов поля ВП и поляризующего поля или их градиентов, служит признаком расположения токового и измерительных электродов по разные стороны от поляризованного тела. Такая возможность практически реализуется при работах способами скважина—поверхность (рис. 83), поверхность—скважина (рис. 123) и скважина—скважина.

Правда, отрицательные значения кажущейся поляризуемости для градиент-установки отнюдь не редкость, потому что они порождаются также косо ориентировкой оси поляризации тела (того же происхождения отрицательные значения  $\eta_{ан}$  за «головой» наклонно залегающего тела в условиях наземной съемки). Дополнительный критерий распознавания аномалии ВП заключается в учете взаимного положения максимумов и минимумов  $\eta_{к}$ . Если тело находится между скважиной и токовым электродом, то минимум  $\eta_{к}$  расположен в скважине ниже, чем максимум. И наоборот, минимум  $\eta_{к}$  расположен выше, чем максимум, если токовый электрод находится от скважины в противоположной стороне от тела (рис. 123).

Одновременное использование двух скважин открывает богатые возможности исследовать внутреннее пространство между скважинами и отчасти внешнее пространство. Однако при расположении токового электрода в одной скважине, а измерительных — в другой графики аномальной кажущейся поляризуемости, получаемые с градиент-установкой, имеют сложную форму, разрывы и интерпретируются с большим трудом. Применение потенциал-установки облегчает истолкование материалов, но оправдывает себя лишь при прослеживании от скважины к скважине того рудного тела, в которое сделано заземление. Высокую разрешающую способность и вместе с тем простые графики  $\eta_{к}$  можно получить, размещая в скважинах только измерительные электроды, по одному в каждой скважине. Токовые электроды могут находиться на поверхности земли или в скважинах, симметрично или несимметрично относительно исследуемого межскважинного блока пород, но так, чтобы поляризующее поле и измерительная линия были ориентированы примерно параллельно друг другу. Меняя ориентировку обеих, можно выполнять азимутальную съемку, достигая большой детальности исследований. Принципы истолкования графиков  $\eta_{ан}$  поясним на теоретическом примере, когда приложенное поле горизонтально и перпендикулярно к скважинам, в которые спускаются измерительные электроды. На рис. 124 приведены графики  $\eta_{ан}$ , соответствующие параллельному спуску измерительных электродов. Если тело находится между скважинами, то аномалия положительна, если вне их — то отрицательна

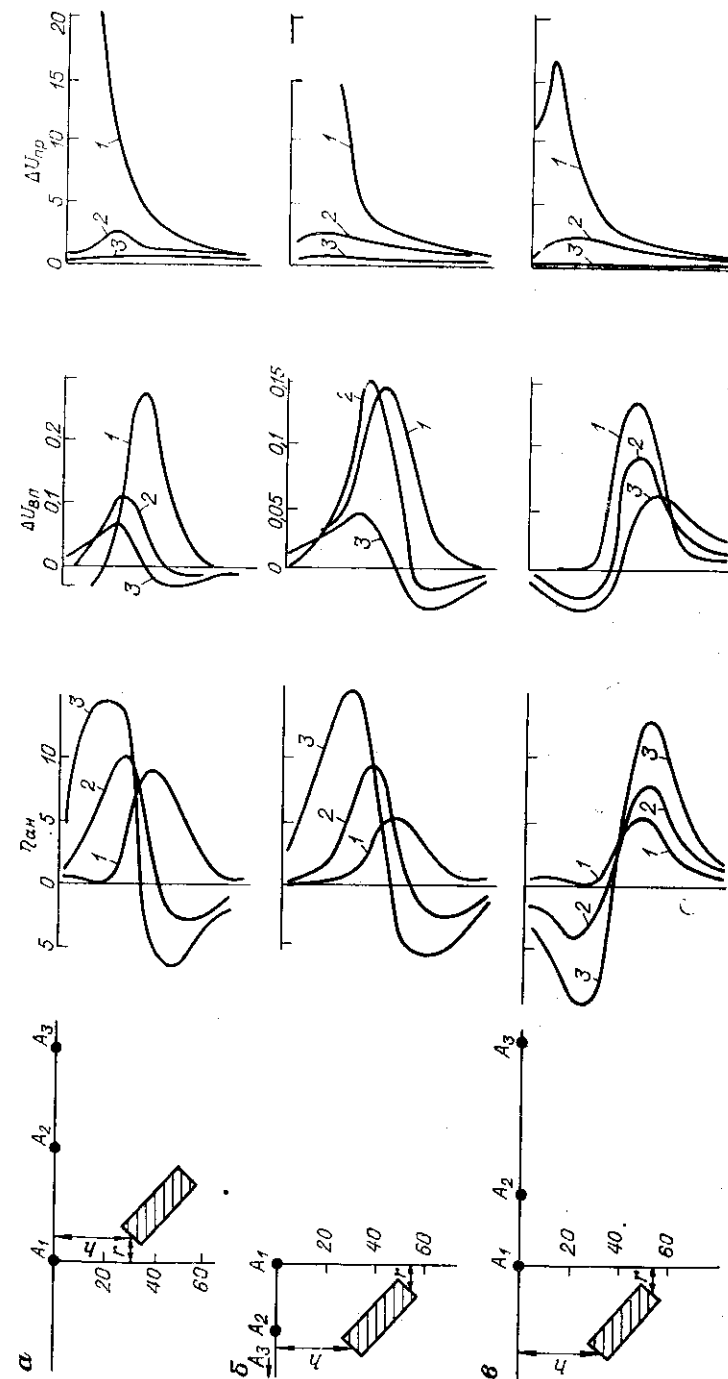


Рис. 123. Графики  $\eta_{ан}$ ,  $\Delta U_{гр}$ ,  $\Delta U_{вп}$ , соответствующие варианту поверхность—скважина, при различном положении токового электрода относительно модели и скважины (по О. М. Шаповалову).

При перемещении токового электрода: а — от устья скважины в направлении падения модели, находящейся между скважиной и токовым электродом, б — в направлении восстания модели; в — от устья скважины в направлении, противоположном расположению модели относительно скважины.

1, 2 и 3 — номера местоположения токового электрода и соответствующих им графиков.

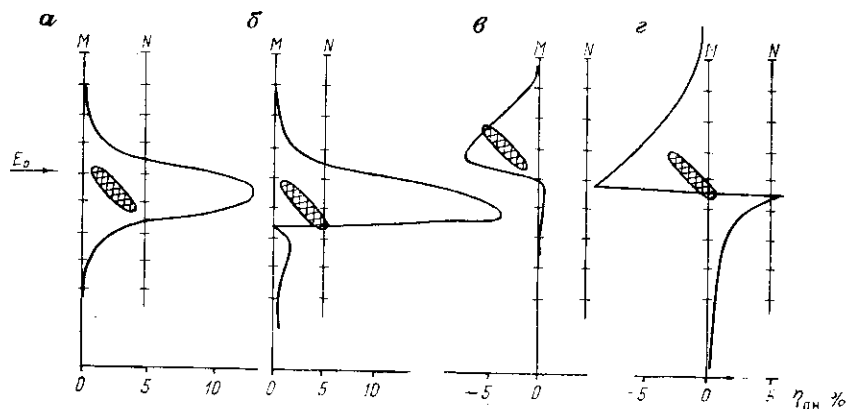


Рис. 124. Теоретические графики аномальной кажущейся поляризуемости, соответствующие параллельному спуску измерительных электродов  $M$  и  $N$  в две скважины.

Сферондальное тело находится:  $a$  — между скважинами,  $б$  — между скважинами, одна из которых пересекает его;  $в$  — вне промежутка между скважинами;  $г$  — в основном вне скважины, одна из которых пересекает тело.

Приложенное поле направлено перпендикулярно скважинам,  $\eta_{изб} = 50\%$ , удельное сопротивление тела такое же, как у вмещающей среды.

(рис. 124,  $a$ ). Если одна из скважин пересекает тело, то часть тела, которая находится между скважинами, отмечается положительной аномалией, а та часть, которая находится во внескважинном пространстве, — отрицательной (рис. 124,  $в$ ). Если тело расположено симметрично между скважинами, график  $\eta_{ан}$  тоже симметричен и по нему нельзя установить направление падения тела. Если наклонное тело расположено несимметрично относительно скважин, то, как видно на рис. 124,  $б$ ,  $г$ , более крутая ветвь графика  $\eta_{ан}$  находится возле ближайшего к скважине конца тела, а пологая соответствует направлению падения или восстания тела относительно этой скважины.

Направление падения тела можно определить, измерив  $\eta_k$  с фиксированным одним из измерительных электродов и подвижным другим электродом. Если неподвижный электрод  $N$  поместить в пределах верхней ветви аномалии  $\eta_k$ , то при перемещении электрода  $M$  получим асимметричный график, крутая ветвь которого расположена в верхней части скважины. Напротив, если неподвижен электрод  $M$ , а перемещается  $N$ , то крутая ветвь графика  $\eta_k$  расположена в нижней части скважины.

Направление падения тела ярко проявляется при изменении ориентировки поляризуемого поля за счет перемещения токовых электродов. Значение  $\eta_{ан}$  максимально, когда поле и измерительная линия параллельны большой оси поляризуемого тела.

## ОПРЕДЕЛЕНИЕ ПОЛЯРИЗУЕМОСТИ И ЭЛЕКТРОПРОВОДНОСТИ ТЕЛ

С определенными оговорками, касающимися случаев пересечения линией наблюдения контактов сред и некоторых условий вертикального зондирования (см. гл. II), можно считать, что аномальная кажущаяся поляризуемость не превышает избыточной поляризуемости тела. Для вкрапленных руд, электрическая проводимость которых того же порядка, что у вмещающих пород, связь максимальной  $\eta_{ан}$  с избыточной поляризуемостью можно упрощенно принять как линейную, причем коэффициент пропорциональности тем больше, чем больше размер тела по сравнению с глубиной его залегания:

$$\eta_{ан} \approx \eta_{изб} (a/h)^n, \quad (301)$$

где  $a$  — радиус тела или полумощность пласта;  $h$  — глубина центра тела.

Показатель степени зависит от формы тела:  $n = 0$  в случае двухслойной среды при достаточно большом разnose электродов ( $AO \gg h$ );  $n = 1$  для трехслойной среды (горизонтального пласта) при оптимальном разnose  $AO$ ;  $n = 2$  в случае горизонтального кругового цилиндра ( $AO \gg h$ );  $n = 3$  для шара. Если удастся оценить форму, размеры, глубину тела и построить разрез поляризованной среды, то можно вычислить его избыточную поляризуемость:

$$\eta_{изб} = \eta_{ан} (h/a)^n. \quad (302)$$

Различие в значении электрической проводимости тела и вмещающей среды приводит к занижению избыточной поляризуемости, вычисляемой по формуле (302), по сравнению с истинной. Для горизонтального пластообразного тела можно прибегнуть к более точной формуле (256) и количественно учесть соотношение электрических проводимостей.

В случае крутопадающего пласта с большой протяженностью в глубину при  $\rho_2 = \rho_1$  для установки срединного градиента зависимость  $\eta_{ан}$  от  $\eta_{изб}$  аппроксимируется формулой (269), в согласии с которой при решении обратной задачи

$$\eta_{изб} = \eta_{ан} \pi / \alpha, \quad (303)$$

где  $\alpha$  — угол между лучами, проведенными из точки наблюдения над серединой пласта к его вершинам (рис. 73).

Если разнос  $AB$  недостаточно велик, то для его учета в формулу (303) надо ввести коэффициент  $\Phi_{AB}$ , значения которого даны в табл. 22, тогда

$$\eta_{изб} = \eta_{ан} (\pi / \alpha) \Phi_{AB}. \quad (304)$$

Точные вычисления электрической проводимости тела представляют большие затруднения из-за обычной на практике резкой не-

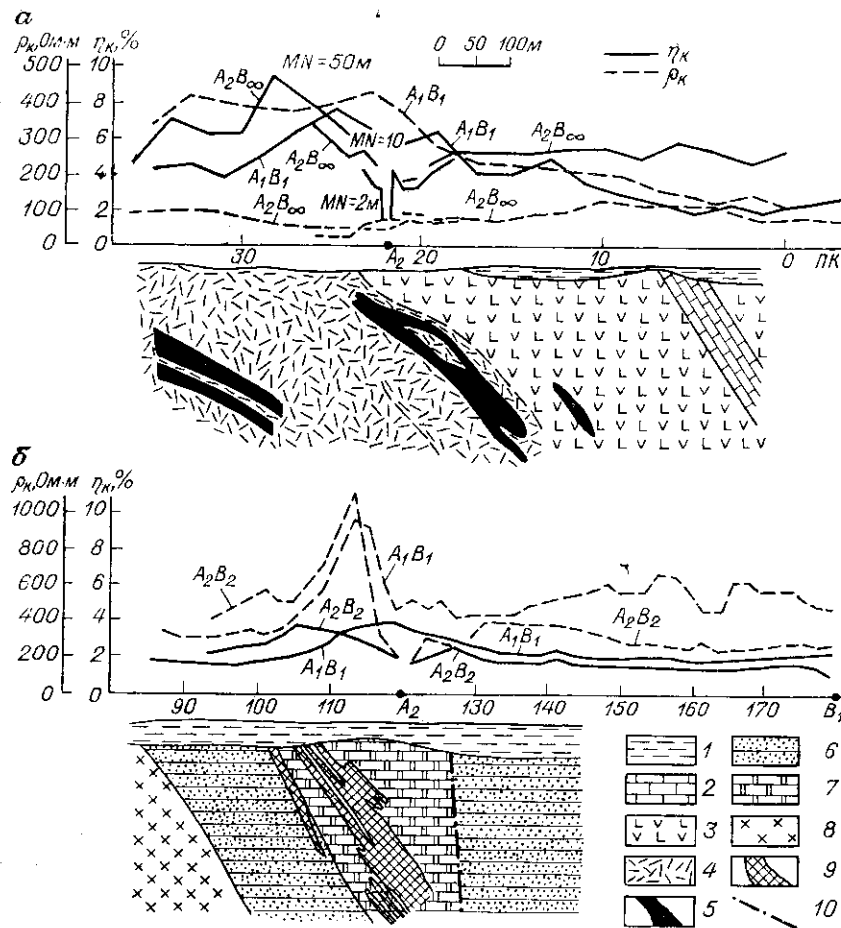


Рис. 125. Графики  $\eta_k$  и  $\rho_k$  при разном положении токовых электродов.

а — медноколчеданное месторождение в Челябинской области;  $A_1$  на ПК 50,  $B_1$  на ПК—10;  $A_2$  на ПК 22,  $B_2$  на «бесконечности»; б — полиметаллическое месторождение в Узбекистане;  $A_1$  на ПК 80,  $B_1$  на ПК 180;  $A_2$  на ПК 120,  $B_2$  на ПК 205 (по материалам Челябинской и Джизакской геофизических экспедиций). 1 — рыхлые отложения; 2 — известняки; 3 — эффузивы и туфы среднего и основного состава; 4 — альбитофиры и их туфы; 5 — медноколчеданные руды; 6 — переслаивание известняков, алевролитов и песчаников; 7 — доломитизированные известняки; 8 — кварцевые порфиры и их туфы; 9 — полиметаллические руды; 10 — тектонические нарушения.

однородности вмещающих пород. Но и грубая ее оценка совершенно необходима. Высокая электрическая проводимость обычно сопутствует сплошным и прожилковым сульфидным рудам, а невысокая — вкрапленным рудам, поэтому даже качественная интерпретация имеет значение при расшифровке геологической природы аномалий ВП.

Как отмечено в гл. II, максимальная аномалия соответствует ориентировке приложенного поля вдоль большой оси хорошо

проводящего тела. Следовательно, признаком высокой электрической проводимости крутопадающего тела служит большая интенсивность аномалий  $\eta_k$  и  $\rho_k$  при расположении токового электрода над «головой» тела. Примерно одинаковые аномалии при изменении положения токового электрода указывают на незначительную разницу в электрической проводимости тела и вмещающих пород. Для пологозалегающего тела признаком высокой проводимости служит большая интенсивность аномалий  $\eta_k$  и  $\rho_k$  в случае расположения тела в середине линии АВ.

При изменении ориентировки поля заметную роль помимо электрической проводимости и формы тела может играть анизотропия поляризуемости вмещающих пород, если последние представлены графитизированными или пиритизированными сланцами и т. п. (см. гл. II).

На рис. 125 приведены графики  $\eta_k$  и  $\rho_k$  на двух месторождениях. Над обоими при измерениях срединных градиентов получены максимумы  $\eta_k$ . Перемещение токового электрода в середину выявленной аномалии ВП на обоих месторождениях сопровождалось различием ветвей графиков  $\eta_k$  по обе стороны от токового электрода, по которому можно судить о наклонном залегании рудных тел — падении в плоскости чертежа вправо, в сторону более пологого максимума  $\eta_k$ . Вместе с тем обнаруживается высокая электрическая проводимость медноколчеданных руд на первом месторождении и относительно невысокая проводимость вкрапленных полиметаллических руд на втором месторождении. На первом месторождении максимум  $\eta_k$ , соответствующий расположению токового электрода над рудным телом, превысил максимум  $\eta_k$ , соответствующий установке срединного градиента. Кроме того, при расположении токового электрода над телом резко упали значения  $\rho_k$ . На втором месторождении максимумы  $\eta_k$  и  $\rho_k$  остались при перемещении токовых электродов почти неизменными.

Примерами изменений интенсивности аномалий ВП при перемещении токового электрода служат также графики, приведенные на рис. 121.

## ОПРЕДЕЛЕНИЕ СОДЕРЖАНИЯ ЭЛЕКТРОНОВОДЯЩИХ МИНЕРАЛОВ В ТЕЛЕ. ОЦЕНКА ПЕРСПЕКТИВНОСТИ АНОМАЛИЙ ВП

Объемную концентрацию электропроводящих минералов в поляризуемом теле  $\xi$  можно оценить с помощью следующей формулы, получаемой из формулы (120) в предположении, что  $\xi \leq 0,2$ :

$$\xi = \frac{\eta^*}{\rho_c (1 - \beta \eta^* / \rho_c)} \approx \frac{\eta^*}{\rho_c (1 - \eta^*)}, \quad (305)$$

где  $\eta^*$  — поляризуемость тела, обусловленная электропроводящими включениями;  $\beta$  — коэффициент, зависящий от размера, формы и состава включений, а также от режима измерений поляризуемости (см. гл. II).

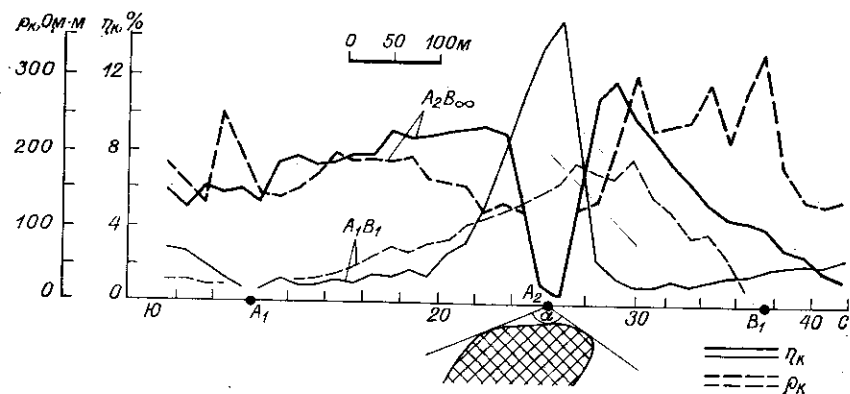


Рис. 126. Графики  $\eta_k$  и  $\rho_k$  при разном положении токовых электродов  $A$  и  $B$  на поисковом участке.  
Штриховкой показано тело, объясняющее форму графиков.

Экспериментальные значения  $\beta_c$  для  $t_s = 3$  мин,  $t = 0,5$  с находятся между 1 и 4,5. Средние значения  $\beta_c$  для вкрапленных руд ряда медных и полиметаллических месторождений равны 2,6 [20, 128, 303]. Для каждого типа руд можно установить значения  $\beta_c$  путем соответствующих измерений поляризуемости и содержания рудных минералов в образцах, в скважине и т. д.

Если породы, вмещающие исследуемое тело, не содержат электропроводящих минералов, то  $\eta^* = \eta_{изб}$  и при вычислениях по формуле (305) вместо  $\eta^*$  можно брать  $\eta_{изб}$ , определяемую по формулам (302) и (304). Если вмещающие породы сами содержат электропроводящие минералы, то  $\eta^* > \eta_{изб}$  и для определения  $\eta^*$  надо использовать формулу (124).

В предыдущих разделах показаны приемы определения геометрической формы и положения поляризуемого тела. Надо подчеркнуть, что доведение интерпретации данных метода ВП до построения геоэлектрического разреза и оценки значения  $\xi$  совершенно необходимо для оценки перспективности аномалий ВП.

Рассмотрим последовательность определения параметров тела на примере работ на одном из поисковых участков, где геологами ожидалось полиметаллическое оруденение. Здесь была установлена интенсивная аномалия ВП, четко прослеживаемая от одного профиля к другому на протяжении более 1 км. Графики  $\eta_k$  и  $\rho_k$  по одному из профилей показаны на рис. 126. Сначала аномалия  $\eta_k$  находилась в середине линии  $AB$ , затем один из токовых электродов был помещен в центр выявленной аномалии и измерения на профиле повторены. Анализируя графики, приходим к следующим выводам.

1. Возмущающий объект является одиночным, поскольку при первом положении токовых электродов  $A_1B_1$  наблюдается один

простой максимум  $\eta_k$ , а при втором положении  $A_2B_2$  — два максимума  $\eta_k$ , расположенные по обе стороны от первого.

2. Проекция «головы» объекта на линию профиля располагается от ПК 23 до ПК 28 и имеет ширину 100 м. Это следует из положения точек перегиба графика  $\eta_k$  срединного градиента и положения максимума  $\eta_k$  при размещении токового электрода над объектом.

3. Тело падает на юг (на рисунке влево). Это следует из того, что:

а) график  $\eta_k$  срединного градиента асимметричен и его более пологая ветвь находится слева;

б) при расположении токового электрода над телом левый максимум  $\eta_k$  по интенсивности меньше, а по ширине больше, чем правый.

4. Тело имеет значительную протяженность по падению. Это следует из отсутствия глубоких минимумов  $\eta_k$  при обоих положениях токовых электродов.

5. Угол падения тела имеет среднее значение (40—60°). Это следует из четкого проявления асимметрии графика  $\eta_k$  срединного градиента и значительного различия интенсивности и ширины максимумов  $\eta_k$  при расположении токового электрода над телом.

6. Электрическая проводимость тела невелика. Это следует из того, что над телом наблюдается повышение  $\rho_k$  как при измерении срединных градиентов, так и при расположении токового электрода над телом. Подтверждением служит большая интенсивность максимума  $\eta_k$  при первом положении токовых электродов, чем при втором.

7. Глубина верхней границы тела в районе ПК 26, где находился электрод  $A_2$ , составляет примерно 15 м. Это следует из положения точки перегиба на левой ветви графика  $\eta_k$  при расположении токового электрода над телом.

Таким образом, тело имеет форму падающего на юг под углом 40—60° пласта, горизонтальную мощность 100 м, глубину залегания 15 м и невысокую электрическую проводимость. Это тело показано на рис. 126. Угол между лучами, проведенными из точки профиля, соответствующей максимуму  $\eta_k$  срединного градиента, к вершинам пласта, составляет 125°. Между тем максимум  $\eta_k$  равен 15%, а фон поляризуемости достигает 13%. Воспользовавшись формулой (303), найдем избыточную поляризуемость пласта  $\eta_{изб} = (180^\circ/125^\circ) \cdot 13\% = 18\%$ . Далее по формуле (305) оценим объемную концентрацию электропроводящих минералов в теле

$$\xi = \frac{18\%}{2,6(1 - 0,18)} = 8,5\%.$$

Большая протяженность тела по простиранию и в глубину, сочетание небольшой концентрации электронных проводников с низкой электрической проводимостью тела и изучение данных геологической съемки привели к убеждению, что рассмотренная анома-

разделять сульфидные и графитовые тела [144, 146, 203], имеются также экспериментальные данные, указывающие на заметное различие НВП у полиметаллических руд, медных руд и пиритовых тел [270, 272]. В каждом районе складывается более или менее оригинальный комплексный способ поисков месторождений. Вместе с тем можно указать общие принципы комплексирования метода ВП с другими методами, единые для разных районов. Сочетание метода ВП с геохимическими исследованиями позволяет оценивать химическое «лицо» электропроводящих минералов, порождающих аномалии ВП, и увязывать геохимические аномалии с положением сульфидных зон. В благоприятных условиях рельефа местности высокоточная гравитационная съемка позволяет различать аномалии ВП, связанные с тяжелыми сульфидными рудами и легкими графитизированными породами. Анализ данных магниторазведки дает возможность выделить аномалии ВП, обусловленные магнетитовыми зонами. Детальная электроразведка на переменном токе и метод переходных процессов бывают весьма эффективными для выявления внутри широких зон сульфидной вкрапленности участков с хорошо проводящими сплошными сульфидными рудами [68, 156, 213].



# ПРИМЕНЕНИЕ МЕТОДА ВП ПРИ ПОИСКАХ И РАЗВЕДКЕ МЕСТОРОЖДЕНИЙ ПОЛЕЗНЫХ ИСКОПАЕМЫХ

## ПРИНЦИПИАЛЬНЫЕ ВОЗМОЖНОСТИ МЕТОДА ВП

Возможности и роль метода ВП определяются:

1) надежностью выделения создаваемых искомыми телами аномалий ВП;

2) точностью установления положения и свойств поляризуемых тел;

3) степенью многозначности связи поляризационных свойств тел с их химическим или минеральным составом и значением как полезных ископаемых;

4) взаимоотношением стоимости работ и геологического значения приобретаемой информации в сравнении с другими методами.

Аномалия ВП определяется избыточной поляризуемостью исследуемых тел, их размерами, электрической проводимостью и расстоянием до линий наблюдений. Надежность выделения аномалий зависит от соотношения регистрируемых полезных сигналов и помех, порождаемых естественными и промышленными токами в земле, а также колебаниями поляризуемости вмещающих пород.

Влияние сторонних электрических сигналов преодолевается с помощью аппаратурных средств, выбора методики измерений и приемов обработки результатов измерений (см. гл. III). По мере совершенствования аппаратуры и методики измерений возможности проведения работ методом ВП в условиях помех возрастают. Известны примеры удачных работ вблизи электрифицированных железных дорог и на действующих рудниках, оснащенных электровозами [286]. Однако при существующем среднем технологическом уровне работы методом ВП проводятся преимущественно в районах, удаленных от мощных электрических установок.

Достигнутый уровень теоретической разработки метода ВП позволяет с помощью относительно простых и доступных исполнителям полевых работ способов довольно точно устанавливать положение поляризованных тел и оценивать их электрические свой-

ства. Геологическое значение метода ВП существенно зависит от того, в какой мере обнаружение скоплений электропроводящих минералов решает прямо или косвенно задачу обнаружения месторождений полезных ископаемых. Роль метода вызванной поляризации меняется на различных типах месторождений. Применительно к рудным месторождениям соответствующий широкий круг вопросов обстоятельно изложен в монографии «Геофизические поиски рудных месторождений [68]».

Различия  
поляризуемости  
пород и руд

Различие поляризуемости у искомого объекта и у вмещающих пород является необходимой и важнейшей предпосылкой

для успешного применения метода ВП. Поляризуемость ионопроводящих пород, как показано в гл. I, зависит от пористости, влагонасыщенности, степени минерализации внутрипоровой влаги и других факторов, наиболее изменчивых у рыхлых осадочных пород. Соответственно и поляризуемость осадочных пород меняется в отнoсительно больших пределах: при  $t_s = 2$  мин и  $t = 0,5$  с от 0,1 до 3,5%.

На сводной диаграмме, показанной на рис. 128, видно, что породы различного петрографического состава имеют одинаковые пределы изменения поляризуемости. У массивных магматических метаморфических и осадочных пород поляризуемость, как правило, составляет 1—2, а при разрушении и увлажнении их понижается до 0,5—1%.

Влияние физических и химических изменений пород в коре выветривания на физические свойства на примере кварцевых порфиров в Центральном Казахстане отражено в табл. 27. В зоне дезинтеграции поляризуемость нередко оказывается несколько больше, чем у первичных неизмененных кристаллических пород и у полностью разрушенных, превращенных в глину пород. Причиной, вероятно, является гематитизация и омарганцевание кварцевых порфиров в зоне дезинтеграции. Значительное уменьшение поляризуемости в глинистой коре выветривания служит предпосылкой для ее прослеживания с помощью метода ВП. Если над коренными породами кажущаяся поляризуемость составляет 1,5—2,1%, то над участками мощной глинистой коры выветривания, приуроченными к тектоническим нарушениям, наблюдаются узкие отрицательные аномалии ВП, в которых  $\eta_k$  понижается до 0,3—0,5% [191].

К заметному повышению поляризуемости приводят гидротермальные околорудные изменения пород. Эта закономерность обнаружена сотрудниками ВИТР на Рудном Алтае в первые годы применения метода ВП [53, 204] и подтверждена в дальнейшем во многих рудных районах. Объяснение ей дали казахстанские геофизики [209, 212], которые показали, как по мере замещения темноцветных гипогенных минералов серицитом и другими гипергенными минералами увеличивается пористость пород, а поляризуе-

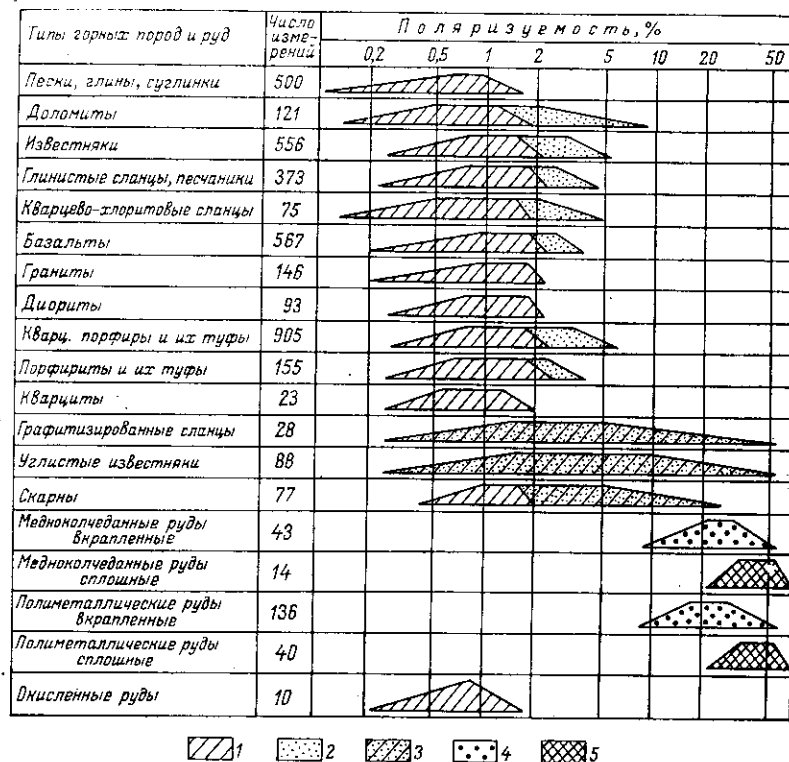


Рис. 128. Сводная диаграмма поляризуемости пород и руд по результатам изучения образцов и полевым параметрическим измерениям.

Положение углов оснований трапеций соответствует минимальным и максимальным значениям поляризуемости, положение углов вершин — средним значениям поляризуемости, полученным разными авторами. Породы: 1 — без заметной вкрапленности электропроводящих минералов, 2 — с вкрапленностью сульфидов, 3 — графитизированные; сульфидные руды: 4 — вкрапленные, 5 — сплошные.

мость последовательно возрастает от 1,1—1,8 до 2,4—2,5%. Рост поляризуемости может быть обусловлен не только изменением пористости, но и появлением в заполненных влагой порах породы чешуек серицита и мелких включений каолина, монтмориллонита и других глинистых минералов, создающих высокую мембранную поляризацию.

И. И. Попов, изучив поляризуемость палеозойских вулканогенно-осадочных пород на площади в несколько сотен квадратных километров, установил, что поляризуемость рудовмещающих карбонатных пород и сланцев выше по сравнению с аналогичными по составу породами других свит (рис. 129). Благодаря этому по данным мелкомасштабной съемки методом ВП (1 : 50 000 и 1 : 100 000) удалось картировать рудовмещающие свиты. Различия в поляризуемости пород составляют 0,5—1,5%. Для такого

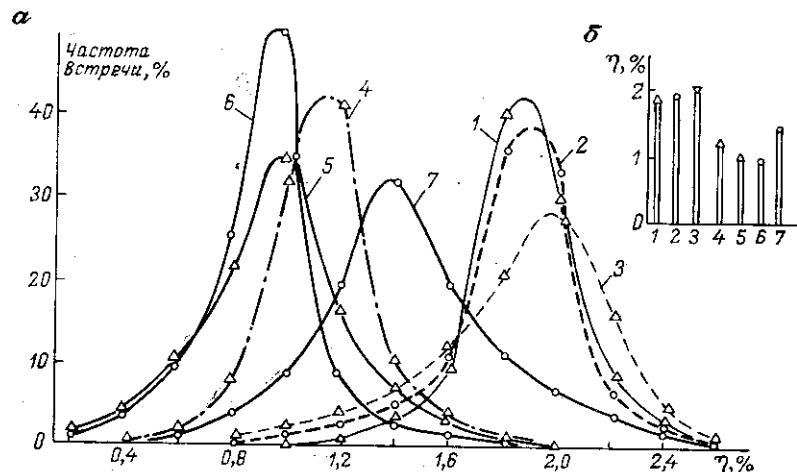


Рис. 129. Вариационные кривые поляризуемости (а) и соответствующие им значения моды поляризуемости (б) для пород Уч-Кулачского района (по И. И. Попову).

1 — бандская свита кварцевых порфиров и их туфов; 2 — нижнеучкулачская свита известняков, алевролитов, аргиллитов и песчаников; 3 — верхнеучкулачская свита доломитизированных известняков; 4 — ханбандытауская свита массивных известняков; 5 — писталитауская свита тонкослоистых известняков; 6 — ментская свита известняков и грубообломочных пород; 7 — устькуруксайская свита аргиллитов, алевролитов, песчаников и известняков.

рода работ потребовалась высокая точность полевых измерений и тщательная обработка полученных материалов.

Применение метода ВП для решения гидрогеологических и инженерно-геологических задач базируется в основном на трех особенностях ВП, выявляемых в обычном режиме измерений при  $t_2 = 1 \div 2$  мин,  $t = 0,5 \div 30$  с:

1) на большей поляризуемости песков и супесей по сравнению с глинами;

ТАБЛИЦА 27

Физические свойства кварцевых порфиров в зоне выветривания (по М. И. Мелентьеву и др. [191])

| Степень изменений                        | Параметры |                 |     |                         |     |            |     |                                  |
|------------------------------------------|-----------|-----------------|-----|-------------------------|-----|------------|-----|----------------------------------|
|                                          | $m$       | $\eta, 10^{-6}$ | $m$ | $\delta, \text{г/см}^3$ | $m$ | $\eta, \%$ | $m$ | $\rho, \text{Ом} \cdot \text{м}$ |
| Зона полного разрушения (глинистая кора) | 31        | 3               | 21  | 1,91                    | 64  | 0,9        | 8   | 7,2                              |
| Зона частичного разложения               | 47        | 2               | 41  | 2,14                    | 9   | 1,7        | —   | —                                |
| Зона дезинтеграции                       | 80        | 3               | 122 | 2,42                    | 41  | 2,7        | 29  | 73                               |
| Неизмененные коренные породы             | 1137      | 5               | 941 | 2,56                    | 905 | 2,1        | —   | 100                              |

$m$  — число исследованных образцов.

2) на большей поляризуемости пород, насыщенных пресной водой, по сравнению с теми же породами, содержащими соленую воду;

3) на меньшей скорости спада напряжения ВП у крупнозернистых песков и гравиев по сравнению с мелкозернистыми песками и глинами.

Поляризуемость пород, не содержащих электропроводящих минералов, как правило, не превышает 1—2%. Для расчленения осадочных пород требуется изучение относительно слабых полей ВП.

Присутствие электропроводящих минералов — главный фактор, определяющий значение поляризуемости. Даже редкая вкрапленность таких минералов, занимающая несколько процентов объема породы, обычно обуславливает поляризуемость 5—10% и делает ее выше предельных значений, наблюдаемых у ионопроводящих пород. В итоге высокие значения поляризуемости становятся надежным признаком наличия электронных проводников. Однозначность индикации электронных проводников по данным метода ВП подкрепляется совместным анализом поляризуемости и удельного сопротивления. Низким значением последнего характеризуются глинистые и другие осадочные породы, содержащие большое количество минерализованной влаги. Напротив, поляризуемость таких пород, имеющих высокую ионную проводимость, минимальна. Кроме того, электронные проводники отличаются на более медленным установлением и спадом ВП. Выявление положительных аномалий ВП, устанавливаемых по превышению наблюдаемой кажущейся поляризуемости над верхним уровнем поляризуемости ионопроводящих пород, служит исходным материалом для решения разнообразных геологических задач, связанных с поисками и разведкой месторождений полезных ископаемых, в которых электропроводящие минералы непосредственно являются искомыми или сопутствуют им.

Интенсивность аномалий ВП, как показано в формуле (301), зависит от избыточной поляризуемости тела, его формы, размера и глубины залегания. Задав минимальное «пороговое» значение  $\eta_{\text{ан}}$  и  $\eta_{\text{изб}}$ , можно установить предельные соотношения размеров и глубины тел, доступных для обнаружения методом ВП.

Например, положив  $\eta_{\text{ан}} = 1$  и  $\eta_{\text{изб}} = 40\%$ , получим, что шарообразное тело, залегающее в однородной среде, можно обнаружить, если глубина его центра не превышает утроенного значения радиуса. При тех же предположениях глубина залегания центра горизонтального пласта может превышать его мощность в 20 раз, т. е. 10-метровый пласт можно найти на глубине 200, а 50-метровый — на глубине 1000 м. Требуемые при этом разности электродов, сила и мощность поляризующего тока и прочие технические условия обсуждены в гл. III.

Сохраняя  $\eta_{\text{ан}} = 1$ ,  $\eta_{\text{изб}} = 40\%$  и пользуясь формулой (303), получаем, что при вертикальном залегании пласта максимальная глубина его верхней кромки может в 12 раз превышать горизонтальную мощность. К примеру, пласт мощностью 50 м можно обнаружить на глубине 600 м. Указанные значения глубины являются предельными для условий наземной съемки. Взятая избыточная поляризуемость соответствует богатым вкрапленным рудам. Возможное отрицательное влияние поверхностного слоя рыхлых отложений не учтено.

Для зон рассеянной сульфидной минерализации, сопутствующих многим рудным месторождениям, среднее значение поляризуемости, на основе опыта массовых измерений образцов и каротажных исследований, может быть принято 10—15%, а их избыточная поляризуемость — в 3—4 раза меньше, чем богатых вкрапленников. Соответственно ослабевают возможности метода ВП. Например, глубина залегания вертикального пласта может превышать его мощность только в 3 раза. Однако надо иметь в виду, что на большинстве медных и полиметаллических месторождений, согласно исследованию М. В. Семенова [261], ширина зон сульфидной минерализации составляет 300—500 м, а длина 1000 м и более. Подобные зоны можно обнаружить на большой глубине, если только электрическая проводимость перекрывающего их слоя безрудных пород не очень высока по сравнению с рудовмещающими породами.

Влияние электрической проводимости верхнего слоя на аномалию, создаваемую вертикальным пластом, изучено М. В. Семеновым. Из полученных им и описанных в гл. II теоретических данных следует, что увеличение электрической проводимости верхнего слоя сопровождается уменьшением доступной глубины исследования:

|                                                                                           |   |   |   |     |     |      |
|-------------------------------------------------------------------------------------------|---|---|---|-----|-----|------|
| Отношение удельных сопротивлений коренных пород и «наносов»                               | 1 | 2 | 9 | 20  | 40  | 100  |
| Отношение предельной глубины залегания вертикального пласта к его горизонтальной мощности | 3 | 2 | 1 | 1/2 | 1/4 | 1/10 |

На многих участках Алтая, Урала и Казахстана в среднем соотношение удельных сопротивлений коренных пород и наносов 10 : 1. В этих условиях доступная наземной съемке глубина исследований примерно равна горизонтальной мощности зон сульфидной минерализации. В качестве иллюстрации на рис. 130 даны примеры работ методом ВП на нескольких месторождениях. Важным свидетельством практических возможностей метода ВП служат исследования, выполненные на территориях Воронежской антеклизы Русской платформы и Подольской тектонической зоны, где мощность чехла осадочных пород, перекрывающих рудоносные породы фундамента, составляет 100—150 м [215, 267].

Глубины исследований методом ВП и другими методами электроразведки и гравиразведки сходны при сопоставимых размерах

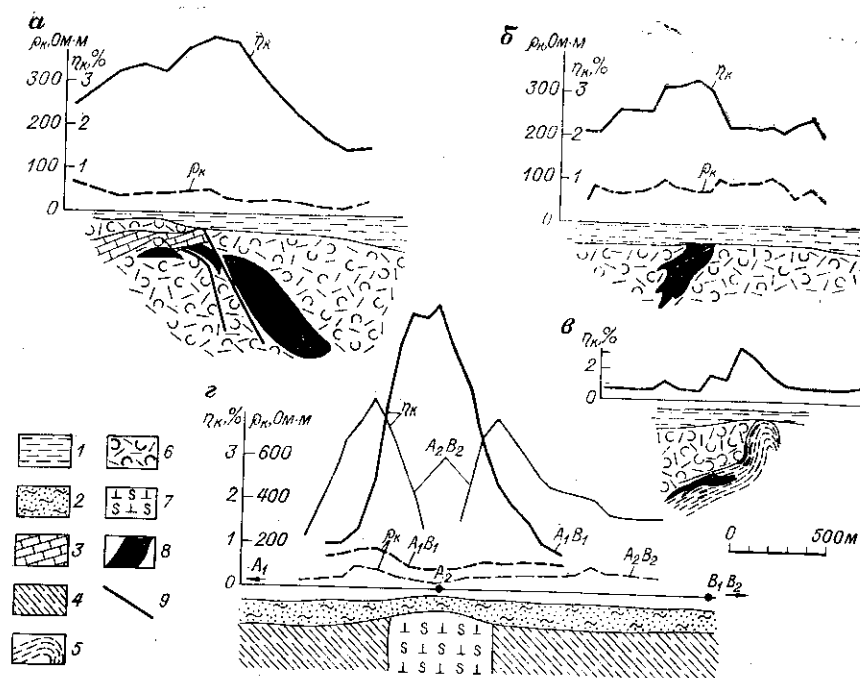


Рис. 130. Графики  $\eta_k$  и  $\rho_k$  над глубоко залегающими месторождениями: медно-колчеданное на Южном (а) ( $AB = 1600$  м,  $MN = 50$  м,  $t = 0,5$  с,  $t_3 = 3$  мин) и Среднем (б) Урале ( $AB = 1000$  м,  $MN = 50$  м,  $t_3 = 3$  мин), полиметаллическим (в) на Рудном Алтае ( $AB = 4000$  м,  $MN = 100$  м,  $t_3 = 10$  с) и медно-никелевым (г) в Воронежской области ( $AB = 3500$  м,  $MN = 50$  м,  $t_3 = 3$  мин).  
1 — рыхлые отложения; 2 — осадочные породы платформенного чехла; 3 — известняки; 4 — сланцы; 5 — гидротермально измененные породы; 6 — туфо-эффузивные породы; 7 — рудоносные серпентинитовые перидотиты; 8 — сульфидные руды; 9 — тектонические нарушения.

тел. Однако требования, предъявляемые к составу тел, различны. Аномалии метода сопротивлений на постоянном и переменном токе предопределяются высокой электрической проводимостью рудных тел, достигаемой лишь при большой концентрации в них электропроводящих минералов, соответствующей сплошным прожилковым и густовкрапленным сульфидным рудам. Аналогично обстоит дело и с гравитационным методом, глубина исследований которым достигает 100 м и более для тел, состоящих из сплошных сульфидных руд, и сокращается практически до первых десятков метров даже для богатых вкрапленных руд [77]. По подсчетам О. М. Шаповалова [303], глубина обнаружения методом ВП изометричного тела вкрапленных руд с массой  $10^6$  т в 1,8—2,6 раза больше, чем доступная гравиметрии. При одинаковой рудной массе относительные возможности метода ВП резко возрастают по мере уменьшения концентрации рудных минералов.

Наименьший объем электропроводящих минералов, создающий пороговую аномалию ВП, для тел шарообразной формы легко

вычислить, воспользовавшись формулой (308). Например, приняв  $\eta_{\text{н}} = 1\%$  и  $\beta_c = 2,6$ , получим  $V_{\text{эл}} \approx h^3/50$ , откуда следует, что если центр тела находится на глубине  $h = 10$  м, то объем сульфидов должен быть не менее  $20 \text{ м}^3$ , а их масса порядка 100 т. Если центр тела находится на глубине 100 м, то требуемый минимальный объем сульфидов возрастает до 20 тыс.  $\text{м}^3$ , а их общая масса до 100 тыс. т.

Для тел иной формы наименьший объем сульфидов, обеспечивающий заметную аномалию ВП, возрастает по мере уменьшения показателя степени в формуле (301), но требуемая концентрация сульфидов падает вплоть до 0,5—1%, достаточных для заметного изменения в условиях двухслойной среды. Здесь уместно напомнить, что вызванную поляризацию порождают только те электропроводящие включения, которые контактируют со сквозными микропорами, заполненными влагой и служащими проводниками электрического тока.

Акцессорные сульфиды, графит и магнетит во многих породах оказываются включенными в кристаллы породообразующих минералов и потому не подвергаются воздействию тока. Подобные включения, конечно, исключаются из обсуждаемых вычислений.

Приведенные в гл. II теоретические данные об отсутствии «ложных» аномалий  $\eta_k$ , создаваемых неоднородностью пород

Влияние неоднородности пород и рельефа местности

удельному сопротивлению, неровностями рельефа и прочими факторами, не связанными с изменением поляризуемости пород, находят убедительные подтверждения в результатах разнообразных полевых работ. Высокая устойчивость фона поляризуемости безрудных пород является одним из важнейших экспериментальных фактов, предопределяющим простоту и надежность выделения аномалий ВП, порождаемых электронными проводниками [53, 123, 134, 242, 388].

В 1955—1956 гг. в северо-западной части Рудного Алтая были выполнены опытные работы на 40 участках, представляющих собой выходы разнообразных пород: нижнепалеозойских метаморфических сланцев, средне- и верхнедевонских аргиллитов, кислых и основных эффузивов и их туфов, герцинских гранитоидов, послегерцинских диабазов и т. д. Поляризуемость в зависимости от степени выветрелости и влажности пород и от присутствия небольшой вкрапленности электропроводящих минералов колебалась от 0,5 до 3,6, но преимущественно составляла 1,5—2%. В отличие от этого рыхлые мезо-кайнозойские отложения, изученные на 15 участках, имели поляризуемость в среднем лишь 0,5% [242].

В пределах безрудных участков иногда наблюдались резкие изменения кажущегося удельного сопротивления, но  $\eta_k$  менялась немного. Например, на выходах змеиногорских гранитов  $\rho_k$  в условиях установки срединного градиента изменилось от 500 до 6000 Ом·м, т. е. более чем в 10 раз. Кажущаяся поляризуемость увеличилась лишь на одну треть: с 1,0 до 1,3% (рис. 131).

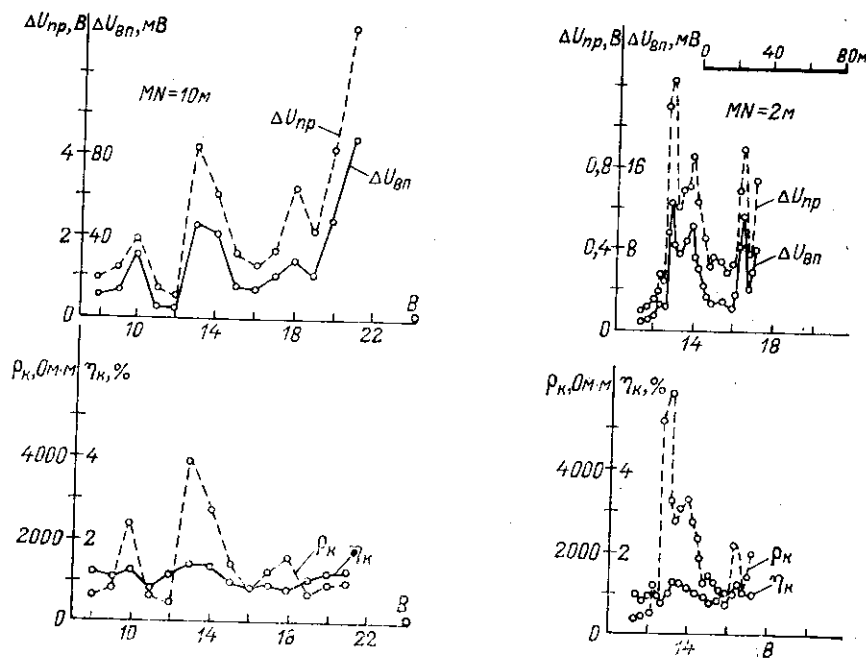


Рис 131. Результаты измерений на выходах гранитов.  
Установка срединного градиента,  $AB = 250$  м,  $MN = 10$  и  $2$  м,  $I = 5$  А.

На Северном Кавказе исследования выполнил А. Е. Гезин [57]. Над гранитами и кристаллическими сланцами  $\rho_k$  комбинированного профилирования менялось от 1000 до 10 000 Ом·м, но кажущаяся поляризуемость лишь немного колебалась вблизи среднего значения, равного 1% (рис. 132).

Слабое влияние изменений удельного сопротивления на поляризуемость кристаллических пород наблюдают во многих районах мира, и это достоинство метода ВП стало общепризнанным. Вместе с тем детально изучена тенденция к некоторому повышению  $\eta_k$  при возрастании сопротивления пород. Б. Е. Жакупов [96] на основе статистической обработки 50 тыс. полевых измерений выявил взаимоотношение  $\eta_k$  и  $\rho_k$  на безрудных участках и предложил способ его учета при выделении слабых аномалий кажущейся поляризуемости.

Сложнее вопрос о роли рельефа местности. А. С. Поляков [222] допускал, что неровности рельефа могут обусловить колебания кажущейся поляризуемости даже при постоянной поляризуемости пород. Однако как теоретические расчеты (см. гл. II), так и опыт полевых работ показывают, что неровности рельефа сами по себе не могут служить причиной даже слабых аномалий  $\eta_k$ . Другое дело, что при неоднородной поляризуемости среды кажущаяся поляризуемость зависит от рельефа местности, потому что

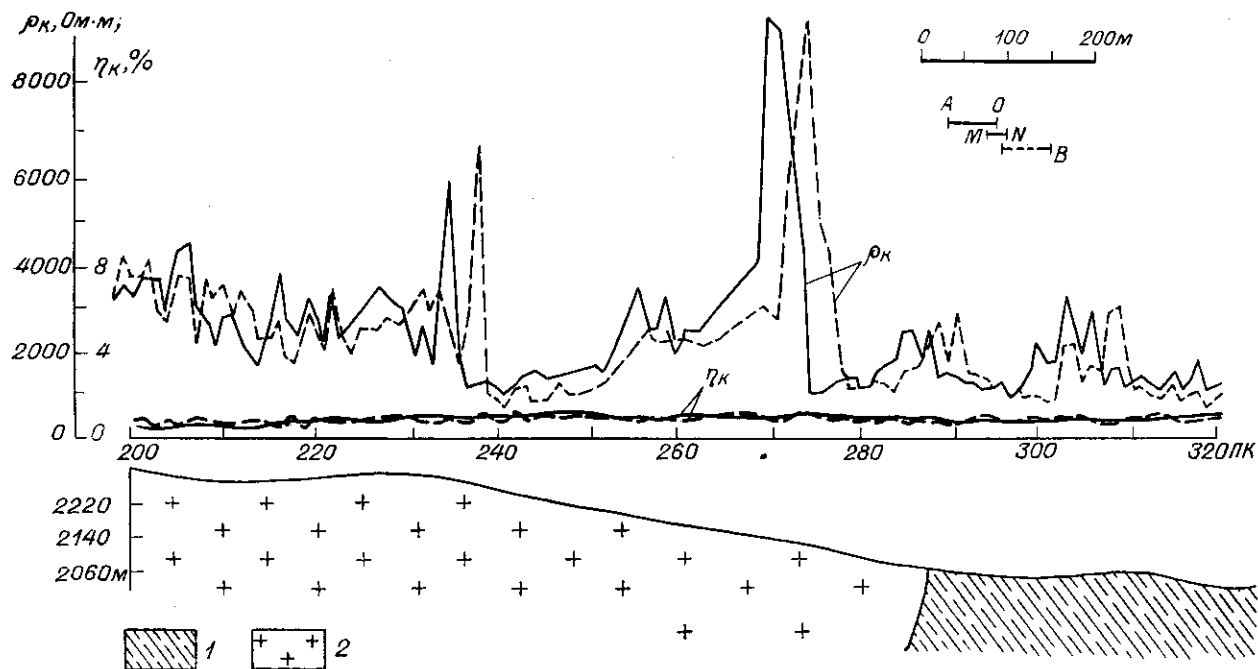


Рис. 132. Графики  $\eta_k$  и  $\rho_k$  kombiniрованного профилирования на безрудном участке  $AO = OB = 50$  м,  $MN = 20$  м (по А. Е. Гезину [57]).

1 — кварцево-биотитовые сланцы, 2 — гранодиориты с пачками сланцев.

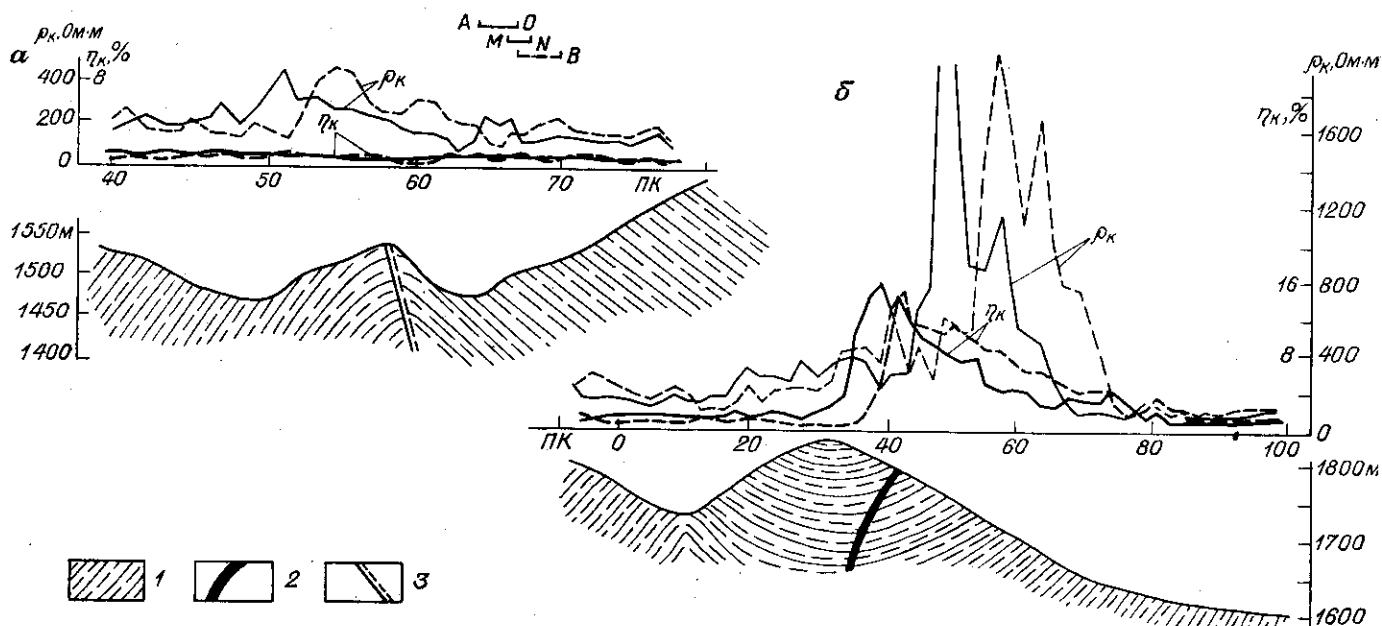


Рис. 133. Графики  $\eta_k$  и  $\rho_k$  kombiniрованного профилирования на безрудном участке (а) и над рудным телом (б) в условиях пересеченного горного рельефа (по А. Е. Гезину [57]).

1 — аргиллиты и глинистые сланцы; 2 — рудное тело; 3 — тектоническое нарушение.

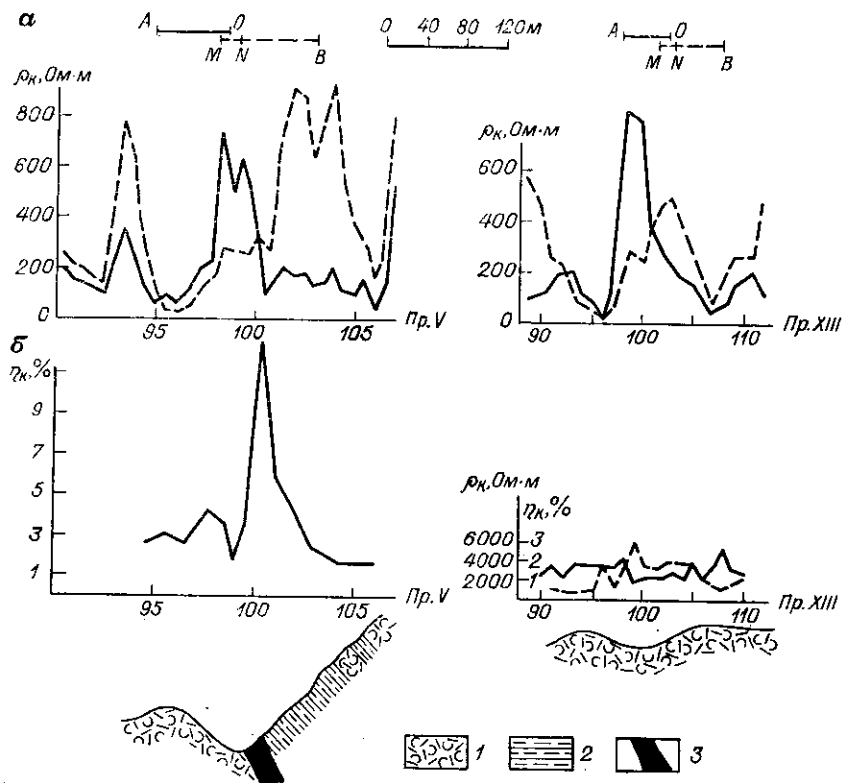


Рис. 134. Графики  $\rho_k$  комбинированного профилирования (а) и графики  $\eta_k$  и  $\rho_k$  срединного градиента (б).  
1 — туфо-эффузивные породы, 2 — сланцы, 3 — сульфидные руды.

наблюдаемое аномальное поле ВП зависит от расположения профиля относительно поляризованного тела [57, 198]. Благодаря рельефу точки наблюдения могут оказаться ближе или дальше к телу по сравнению с прямым профилем. Соответственно трансформируется и аномалия  $\eta_k$ .

Наблюдаемое иногда на возвышенностях повышение  $\eta_k$  является следствием уменьшения мощности наносов и приближения линии наблюдений к коренным породам, обладающим более высокой поляризуемостью. Понижение  $\eta_k$  в долинах связано с увеличением мощности слабо поляризуемых наносов. Подобные колебания кажущейся поляризуемости практически несущественны по сравнению с аномалиями, создаваемыми рудными телами.

На рис. 133 приведены графики  $\eta_k$  и  $\rho_k$  комбинированного профилирования на безрудном участке и на полиметаллическом месторождении в Северной Осетии в обстановке сходного горного рельефа [57]. На безрудном участке значения кажущейся поляризуемости устойчивы и невелики (1—1,5%). Над рудной зоной ка-

жущаяся поляризуемость возрастает до 16%, причем над основным рудным телом наблюдается характерное «обратное» пересечение графиков  $\eta_k$ .

На полиметаллическом месторождении выход рудной зоны расположен не у вершины горы, а в долине. Над рудной зоной получены четкие аномалии  $\eta_k$  комбинированного профилирования и кажущейся поляризуемости, измеренной установкой срединного градиента (рис. 134). Однако аномалия  $\rho_k$  комбинированного профилирования прослеживается вдоль долины и за пределы рудной зоны, причем облик графиков сохраняется. Напротив, аномалия  $\eta_k$  кончается там, где рудное тело выклинивается, а вне месторождения отсутствует, хотя форма рельефа местности сохраняется.

Распространение  
электропроводящих  
минералов в рудах  
месторождений  
промышленных типов

Список электропроводящих минералов дан в гл. I. В табл. 28 перечислены основные промышленные типы рудных месторождений по классификации академика В. И. Смирнова [273]. Для каж-

дого типа месторождений указаны рудные и электропроводящие минералы.

Подавляющее большинство руд содержит электропроводящие минералы в качестве главных компонент. Но среди нескольких десятков электропроводящих минералов лишь немногие создают концентрированные скопления, достаточные для прямого обнаружения методом ВП. Таковы прежде всего сульфиды железа, магнетит и самородный углерод (графит, уголь). Реже встречаются большие скопления сульфидов меди, никеля, свинца и других минералов, являющихся исходным сырьем для получения металлов. К сожалению, нет сводки о распространенности графита в рудах и рудовмещающих породах на разных месторождениях.

Согласно расчетам, сделанным Н. И. Сафроновым [248] на базе геохимических данных, касающихся литосферы в целом, графит занимает примерно 0,05% массы литосферы и частота встречаемости графита в среднем больше, чем сульфидов железа, в 2 раза, халькопирита в 38 раз, пентландита в 34 раза, галенита в 545 раз. В метаморфизованных осадочных породах содержание графита в несколько раз больше, чем среднее для литосферы. Можно ожидать, что примерно в той же пропорции распределяются источники аномалий ВП, если съемку провести на достаточно большой территории.

Практический метод ВП применяется только на заведомо перспективных на то или иное полезное ископаемое площадях, выбранных по данным геологического картирования и по результатам комплексных геохимических и геофизических съемок. Вследствие этого вероятность встречи рудных аномалий ВП оказывается выше вычисленной, но все равно преобладающими остаются графитовые и пирротин-пиритовые аномалии.

ТАБЛИЦА 28

Распространение электропроводящих минералов  
в рудах месторождений промышленных типов

| Металл         | Типы месторождений                                                                                                                                                                               | Рудные минералы                                                                                                          |                                                                                                                                   |
|----------------|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
|                |                                                                                                                                                                                                  | электро-<br>проводящие                                                                                                   | другие                                                                                                                            |
| Черные металлы |                                                                                                                                                                                                  |                                                                                                                          |                                                                                                                                   |
| Железо         | Метаморфические (желе-<br>зистые кварциты)<br>Осадочные морские и<br>озерно-болотные<br><br>Скарновые<br><br>Магматические (титано-<br>магнетитовые)<br>Гидротермальные<br><br>Коры выветривания | Магнетит, гема-<br>тит<br><br><br>Магнетит, немно-<br>го сульфидов<br>Магнетит, ильме-<br>нит                            | Мартит<br><br>Бурый железняк,<br>реже сидерит и<br>железистый хло-<br>рит<br><br><br>Сидерит, бурый<br>железняк<br>Бурый железняк |
| Марганец       | Осадочные морские и<br>озерно-болотные<br><br>Коры выветривания<br><br>Гидротермальные<br><br>Метаморфические                                                                                    | Пирролюзит, га-<br>усманит, кур-<br>накит<br><br><br>Немного сульфи-<br>дов<br>Пирролюзит, га-<br>усманит, кур-<br>накит | Гидроокислы и<br>карбонаты мар-<br>ганца<br>Гидроокислы<br>марганца<br>Родохрозит, родо-<br>нит<br>Силикаты мар-<br>ганца         |
| Хром           | Позднемагматические<br><br>Раннемагматические                                                                                                                                                    | Немного магнети-<br>та, ильменита и<br>медно-никеле-<br>вых сульфидов                                                    | Хромшпинелиды,<br>хромовые хло-<br>риты                                                                                           |
| Титан          | Россыпи<br><br>Коры выветривания<br>Магматические                                                                                                                                                | Ильменит<br><br>Ильменит<br>Магнетит, ильме-<br>нит                                                                      | Рутил, циркон,<br>монацит<br>Рутил                                                                                                |
| Легкие металлы |                                                                                                                                                                                                  |                                                                                                                          |                                                                                                                                   |
| Алюминий       | Осадочные геосинкли-<br>нальные, морские<br>Осадочные платформен-<br>ные, древнеозерные и<br>древнеречные<br>Коры выветривания                                                                   |                                                                                                                          | Бокситы<br><br>Бокситы<br><br>Бокситы                                                                                             |

ПРОДОЛЖЕНИЕ ТАБЛ. 28

| Металл                      | Типы месторождений                                                                                                                                                                                                                                                  | Рудные минералы                                                                                                                                                                |                                                                                                                  |
|-----------------------------|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
|                             |                                                                                                                                                                                                                                                                     | электро-проводящие                                                                                                                                                             | другие                                                                                                           |
| Цветные металлы             |                                                                                                                                                                                                                                                                     |                                                                                                                                                                                |                                                                                                                  |
| Медь                        | Гидротермальные пластовые месторождения вкрапленных руд (медистые песчаники)<br>Гидротермальные прожилково-вкрапленные (меднопорфировые)<br>Гидротермальные колчеданные<br>Гидротермальные жильные<br><br>Магматические ликвидационные (медно-никелевые)            | Борнит, халькопирит, халькозин, пирит<br><br>Халькопирит, пирит, иногда молибденит<br>Пирит, халькопирит<br>Халькопирит, халькозин, пирит<br>Пирротин, халькопирит, пентландит | Сфалерит                                                                                                         |
| Свинец и цинк (полиметаллы) | Гидротермальные метасоматические в туфоэффузивных породах<br><br>Гидротермальные метасоматические в карбонатных породах:<br>а) со скарнами<br><br>б) без скарнов<br>Гидротермальные пластовые тела вкрапленных руд в карбонатных породах<br>Гидротермальные жильные | Галенит, пирит, халькопирит, иногда арсенопирит, блеклые руды<br><br>Галенит, пирит<br><br>Галенит, пирит<br>Пирит, галенит, иногда халькопирит<br><br>Галенит, пирит          | Сфалерит, висмутин, теллуриды<br><br>Сфалерит, иногда реальгар, висмутин<br>Сфалерит<br>Сфалерит<br><br>Сфалерит |
| Никель                      | Магматические медно-никелевые (сульфидные)<br><br>Коры выветривания (силикатные)<br>Гидротермальные жильные                                                                                                                                                         | Пирротин, халькопирит, пентландит<br><br>Сульфиды и сульфидоарсениды никеля и кобальта, ассоциирующие с сульфидами меди, мышьяка, висмута                                      | Силикаты никеля                                                                                                  |

ПРОДОЛЖЕНИЕ ТАБЛ. 28

| Металл         | Типы месторождений                                                         | Рудные минералы                                                                   |                                               |
|----------------|----------------------------------------------------------------------------|-----------------------------------------------------------------------------------|-----------------------------------------------|
|                |                                                                            | электропроводящие                                                                 | другие                                        |
| Сурьма         | Гидротермальные пластовые                                                  |                                                                                   | Антимонит, иногда киноварь и др.              |
|                | Гидротермальные жильные                                                    | Пирит, арсенопирит, галенит                                                       | Антимонит                                     |
| Редкие металлы |                                                                            |                                                                                   |                                               |
| Олово          | Россыпи                                                                    |                                                                                   | Касситерит                                    |
|                | Гидротермальные касситеритово-сульфидные                                   | Тиллит, станнин, арсенопирит, пирротин, галенит                                   | Касситерит                                    |
|                | Гидротермальные касситеритово-кварцевые                                    | Иногда арсенопирит, молибденит                                                    | Касситерит                                    |
|                | Пегматитовые                                                               |                                                                                   | Касситерит                                    |
| Вольфрам       | Скарновые шеелитовые                                                       | Пирротин, халькопирит, пирит                                                      | Шеелит, вольфрамит                            |
|                | Штокверковые шеелитовые                                                    |                                                                                   | Шеелит, вольфрамит                            |
|                | Гидротермальные жильные                                                    | Молибденит, арсенопирит, пирротин                                                 | Вольфрамит, шеелит, касситерит                |
|                | Россыпи                                                                    |                                                                                   | Вольфрамит, касситерит                        |
| Молибден       | Гидротермальные прожилково-вкрапленные                                     | Молибденит, халькопирит, пирит                                                    |                                               |
|                | Скарновые                                                                  | Молибденит, пирит                                                                 | Шеелит                                        |
|                | Гидротермальные жильные                                                    | Молибденит, арсенопирит                                                           | Вольфрамит, касситерит                        |
| Бериллий       | Пегматитовые                                                               | Молибденит                                                                        | Берилл                                        |
|                | Гидротермальные жилы                                                       |                                                                                   | Вольфрамит, касситерит, берилл, шеелит        |
|                | Скарновые                                                                  | Магнетит                                                                          | Гельвин, даналит, хризоберилл, берилл, шеелит |
| Кобальт        | Извлекается из комплексных медно-никелевых, полиметаллических и других руд | Пентландит, пирит, халькопирит, кобальтин, арсенопирит, глаукоdot, магнетит и др. |                                               |

ПРОДОЛЖЕНИЕ ТАБЛ. 28

| Металл              | Типы месторождений                                                            | Рудные минералы                                                      |                |
|---------------------|-------------------------------------------------------------------------------|----------------------------------------------------------------------|----------------|
|                     |                                                                               | электропроводящие                                                    | другие         |
| Ртуть               | Гидротермальные пластовые                                                     | Пирит, метациннабарит и самородная ртуть                             | Киноварь       |
|                     | Гидротермальные жильные                                                       | Пирит, марказит                                                      | Киноварь       |
|                     | Гидротермальные гнездовые                                                     | Пирит, марказит                                                      | Киноварь       |
| Благородные металлы |                                                                               |                                                                      |                |
| Золото              | Гидротермальные кварцево-золотые жилы                                         | Золото, арсенопирит, пирит, пирротин, халькопирит и др.              |                |
|                     | Гидротермальные метасоматические зоны измененных пород с золотом              | Золото, сульфиды                                                     |                |
|                     | Гидротермальные колчеданно-золотые месторождения                              | Золотосодержащие сульфиды                                            |                |
|                     | Россыпи                                                                       | Золото                                                               |                |
|                     | Метаморфизованные золотоносные конгломераты                                   | Золото, пирит, магнетит                                              |                |
|                     | Гидротермальные золото-серебро-теллуrowые (иногда селеновые) месторождения    | Пирит, халькопирит, галенит                                          | Сфалерит       |
| Серебро             | Извлекается из комплексных полиметаллических, колчеданно-золотых и других руд | Сульфиды железа, меди, свинца, блеклые руды, аргентит, серебро и др. | Сульфиды цинка |
| Платина             | Магматические медно-никелевые месторождения с платиной                        | Сперрилит, платина, пирротин, пентландит, халькопирит                |                |
|                     | Магматические хромшпиделиновые месторождения с платиной                       | Поликсен, платина, хромит, титаномагнетит                            |                |
|                     | Россыпи                                                                       | Платина, иногда титаномагнетит                                       | Хромит         |

Вероятность встречи халькопиритовой, пентландитовой и тому подобной аномалии чрезвычайно мала, потому что даже промышленные медные, никелевые и прочие сульфидные руды преимущественно сложены пиритом или пирротинном. Поэтому ценность аномалий ВП определяется, с одной стороны, пространственной связью искоемых руд с зонами пирит-пирротиновой или графитовой минерализации, с другой — возможностями установления их природы на основе имеющихся геологических, геохимических и геофизических материалов. Соответственно и практическая отдача метода ВП зависит от того, в какой мере выявление скоплений электропроводящих минералов решает геолого-поисковые задачи и насколько глубоко исполнители работ вникли в геологическую обстановку, чтобы верно оценивать значение обнаруживаемых зон сульфидной, графитовой или магнетитовой минерализации.

В создании аномалий ВП участвуют весьма протяженные ореолы рассеянной сульфидной (чаще всего пиритовой) минерализации, в пределах которых рудные залежи занимают небольшие участки. Оценка таких аномалий ВП представляет известную проблему. Однако вне зон сульфидной минерализации поиски месторождений рассматриваемых типов вообще малоперспективны. На многих месторождениях гидротермального генезиса околорудная пиритизация пород имеет тенденцию наибольшего развития вверх от рудной залежи. Поэтому аномалии ВП сопутствуют некоторым весьма глубоким рудным телам, особенно когда они приурочены к крутопадающим тектоническим зонам. Например, в Приморье локальная аномалия ВП обнаружена Б. П. Самариным [246] над рудным телом, залегающим на глубине 450—700 м.

Часты случаи, когда метод ВП не может служить средством прямых поисков месторождений, но дает полезную информацию о зонах сульфидной минерализации, о графитизированных тектонических зонах и о других электропроводящих объектах, имеющих определенное значение в качестве поисковых признаков. Ценность этой информации возрастает в районах с большой мощностью наносов и прочих безрудных пород, перекрывающих рудоносные образования и затрудняющих геологическую съемку.

Обзор результатов применения метода ВП на различных месторождениях дан ниже. Электропроводящие минералы сопровождают не только руды черных, цветных, редких и благородных металлов, но также месторождения слюды, корунда, фосфоритов, нефти и газа. С каждым годом расширяется фронт работ методом ВП и обнаруживаются его новые возможности. Электропроводящий самородный углерод является составной частью антрацитов, шунгитов и многих сортов каменных углей. Это служит предпосылкой применения метода ВП при изучении разрезов скважин и при наземных съемках на угольных месторождениях. Предложенный В. Н. Дахновым и А. А. Коржевным электролитический

каротаж в свое время получил широкое распространение [40, 41, 79, 85, 87, 356].

Попыток применить метод ВП для поисков каменноугольных месторождений сделано немного. В Горловском бассейне И. Н. Куташов и А. И. Марус [171], используя установку ВЭЗ, установили, что над угленосными отложениями кажущаяся поляризуемость возрастает до 7—12%, между тем как поверхностные рыхлые отложения и непродуктивные палеозойские породы характеризуются поляризуемостью 1,5—2%. Авторы сочли метод ВП слишком громоздким и отдали предпочтение дифференциальной установке MAN метода сопротивлений. Обстоятельное изучение поляризационных свойств углей, выполненное А. Ф. Сергатуком [266], показало, что поляризуемость большинства марок каменных углей, полуантрацитов и антрацитов составляет 20—80% и резко отличается от низкой поляризуемости вмещающих осадочных пород. Метод ВП может решать определенные задачи, вплоть до оценки типа угля, при выявлении угольных пластов.

Электронной проводимостью обладает древесный уголь. Остатками костров иногда объясняются локальные аномалии ВП, встречаемые в лесах. Исследования полусгоревших остатков деревянных сооружений с помощью метода ВП могут быть использованы в археологии [148].

## МЕСТОРОЖДЕНИЯ ЧЕРНЫХ МЕТАЛЛОВ

### Железо

Многие железорудные месторождения, относящиеся к группам осадочных, гидротермальных, и коры выветривания не содержат в качестве основных электропроводящих минералов. На магматических, скарновых и метаморфических месторождениях в составе руд ведущую роль играет электропроводящий магнетит; кроме того, в значительных количествах встречаются гематит и ильменит, а на скарновых месторождениях — еще и сульфиды. Магнетитовые месторождения обычно успешно выявляются с помощью магниторазведки, и оснований для использования более дорогого метода ВП часто нет. Тем не менее, когда применение магниторазведки осложняется из-за высокого и неустойчивого магнитного поля вмещающих пород, метод ВП становится полезным дополнением поискового комплекса как средство оконтуривания магнетитовых залежей и оценки их глубины.

Выше уже отмечалось, что содержащие акцессорный магнетит основные и ультраосновные породы обладают низкой поляризуемостью, хотя создают интенсивное магнитное поле [186, 187, 215, 303]. В то же время магнетитовые руды обладают высокой поляризуемостью и отмечаются четкими аномалиями  $\eta_k$ . В качестве примера на рис. 135 показаны результаты магниторазведки и метода ВП на контактово-метасоматическом месторождении в Горной Шории [78]. Рудные тела, содержащие магнетит и вклю-

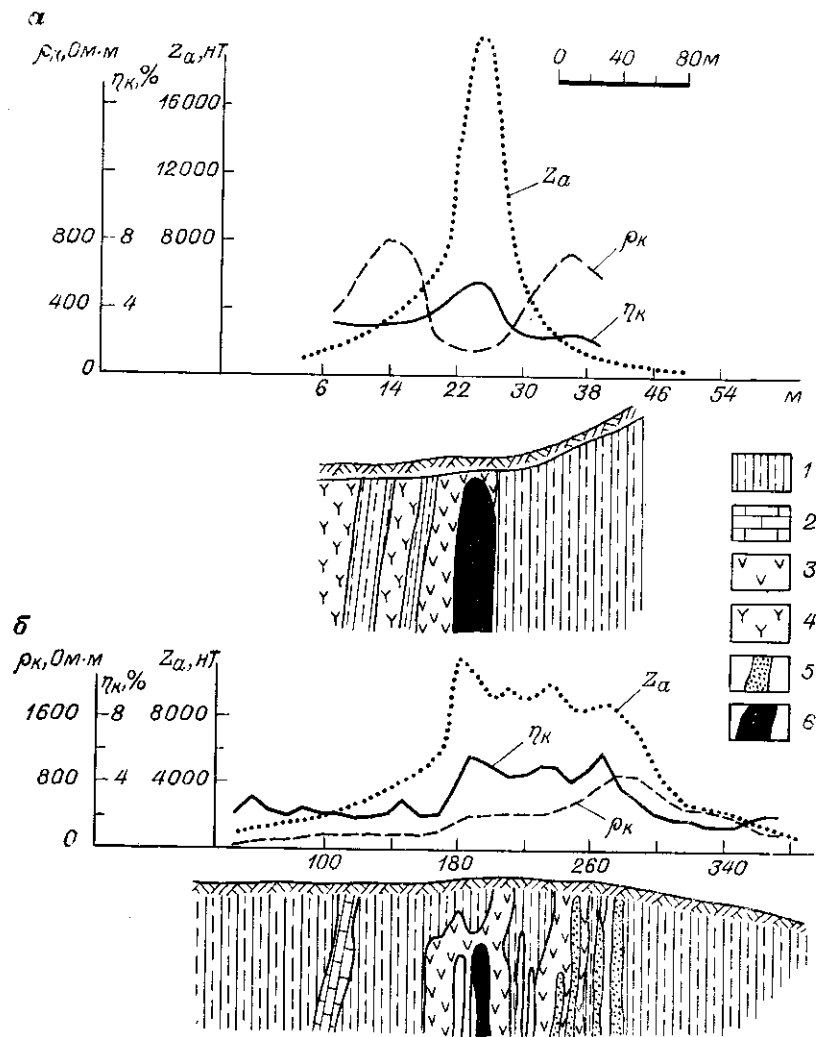


Рис. 135. Графики  $\eta_k$ ,  $\rho_k$  и  $Z_a$  на железорудном месторождении (по А. З. Горину [78]).

1 — сланцевая толща; 2 — мраморы; 3 — порфиры; 4 — гнейсы; 5 — рудный скори; 6 — магнетитовая руда.

чения сульфидов, приурочены к сланцевой толще с линзами мраморов, прорванной многочисленными мелкими штоками порфиров и сенинов. Тела имеют столбообразную и пластообразную форму, выдержаны на глубину и достигают по мощности 5—10 м.

Работы проведены по схеме срединного градиента ( $AB = 260 \div 600$  м,  $MN = 20 \div 40$  м) на двух участках месторождения. На первом из них, где магнетитовые руды имеют низкое удельное со-

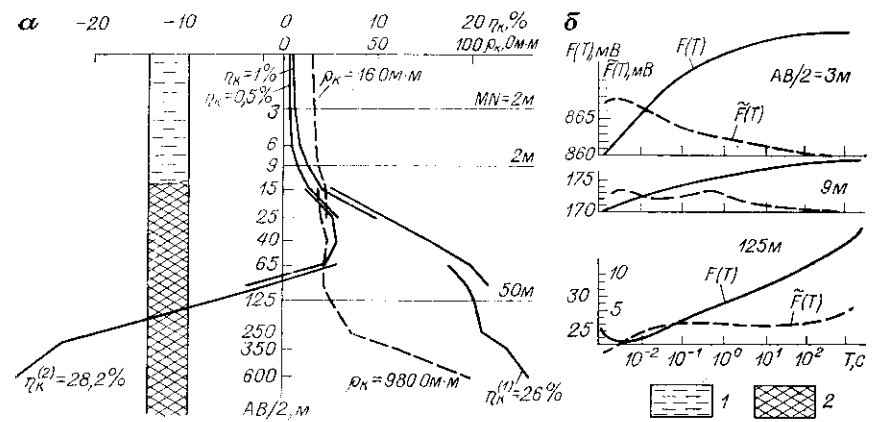


Рис. 136. Результаты измерений на Теченском магнетитовом месторождении.

а — графики  $\eta_k$  и  $\rho_k$  вертикального зондирования; б — временные зависимости  $F(T)$  и  $\tilde{F}(T)$  для трех различных разносов  $AB$  (по О. М. Шаповалову). 1 — рыхлые отложения; 2 — магнетитовые руды.

противление (порядка единиц — десятков ом·метров), получены четкие максимумы  $\eta_k$  и вертикальной составляющей аномального магнитного поля  $Z_a$  и минимум  $\rho_k$  (рис. 135, а).

На втором участке, где согласно геологическим данным широко развиты окисленные руды, представленные мартитом и полумартитом, и первичные руды залегают на глубине 50—70 м, аномалия  $\eta_k$  остается четкой и коррелирующей с аномалией  $Z_a$ , но над телами наблюдается не понижение, а повышение  $\rho_k$  (рис. 135, б). Причина изменений в поведении  $\rho_k$  заложена в высоком удельном сопротивлении мартитов (до 60 000 Ом·м).

Р. В. Терехова и В. М. Кириллов [281], используя данные В. И. Иголкина [103], исследовали возможность метода ВП для определения природы слабых магнитных аномалий в Восточных Саянах и пришли к выводу, что с помощью метода ВП можно не только уточнять природу магнитных аномалий, но и по временным характеристикам ВП различать сливные и вкрапленные магнетитовые руды.

Присущие магнетитовым рудам временные характеристики ВП показаны на рис. 136, где приведены графики  $\eta_k$  и  $\rho_k$  вертикального зондирования над магнетитовым месторождением на Южном Урале, а также графики переходных характеристик ВП и их производной по логарифму времени для нескольких разносов токовых электродов.

В зависимости от выбора моментов отсчета ВП можно получить разные графики зондирования. Например, если взять  $T_1 = 0,5$  с и  $T_2 = 60$  с, то кажущаяся поляризуемость  $\eta_k^{(1)} = [F(60) - F(0,5)] / [\Delta U_{пр}(0,007)]$  соответствует обычным для метода ВП измерениям  $\eta_k$  через 0,5 с после минутной зарядки. Если взять

$T_1 = 1,5$  и  $T_2 = 7$  мс, то вычисленная кажущаяся поляризуемость  $\eta_k^{(2)}$  отражает главным образом электродинамические эффекты становления поля.

При небольшом разnose  $AB = 6$  м, когда сказываются преимущественно поверхностные рыхлые отложения, производная  $\eta_k$  имеет максимум при  $T_{\max} = 4$  мс и монотонный спад до 20 мин, в течение которых вели измерения. При  $AB = 18$  м на графике производной (помимо первого максимума при  $T = 4$  мс) наметился второй максимум при  $T_{\max} \approx 0,2$  с. При относительно большом разnose электродов  $AB = 250$  м, когда в значительной мере проявилось влияние рудного тела, залегающего на глубине 10—15 м, переходная характеристика ВП существенно изменила свою форму. В начальной стадии переходного процесса появился минимум  $F(T)$ , так что значение  $\eta_k^{(2)}$  стало отрицательным из-за индукционных процессов в рудном теле, а в поздней стадии ВП возникли два максимума производной  $\eta_k$ : при  $T_{\max} \approx 100$  и 2000 с.

Приведенные данные свидетельствуют, что:

1) рыхлые отложения имеют поляризуемость меньше 1% и временной параметр  $T_{\max}$  порядка единиц миллисекунд;

2) рудовмещающие туфо-эффузивные породы имеют поляризуемость около 2% и временной параметр порядка десятых долей секунды;

3) прожилково-вкрапленные магнетитовые руды имеют поляризуемость около 20% и временной параметр примерно 100 с;

4) сплошные магнетитовые руды имеют поляризуемость свыше 20% и временной параметр не менее 2000 с.

В Дашкесанском районе Азербайджана выделить магнетитовые рудные тела, имеющие пологое залегание (угол падения не более  $10^\circ$ ) и расположенные среди интрузивных и эффузивных пород, с помощью обычных магнитных и гравитационных съемок трудно. Местные геофизики применили вертикальное зондирование по методу ВП [292] и установили, что рудные залежи уверенно фиксируются на графиках  $\eta_k$ , а по точке перегиба графиков легко определить глубину рудного пласта. Кроме того, присутствие хорошо проводящих сплошных руд подтверждается минимумом  $\rho_k$ , а этим они отличаются от оруденелых скарнов.

В Узбекистане на месторождении магнетит-мартитовых руд аномалии ВП оказались небольшими [31]. Над мощной зоной магнезиальных скарнов, выходящей на поверхность земли и отмечаемой магнитными аномалиями интенсивностью 5000 нТ, кажущаяся поляризуемость поднялась лишь до 6%, а на тех профилях, где мощность оруденелых скарнов уменьшилась до 80 м и над скарнами имелся слой «пустых» известняков 20—30 м, аномалии  $\eta_k$  уже не было. Правда, и интенсивность магнитных аномалий здесь составляла 1100 нТ.

Магматические месторождения ильменито-магнетитовых руд, по всей вероятности, являются удобным объектом для метода

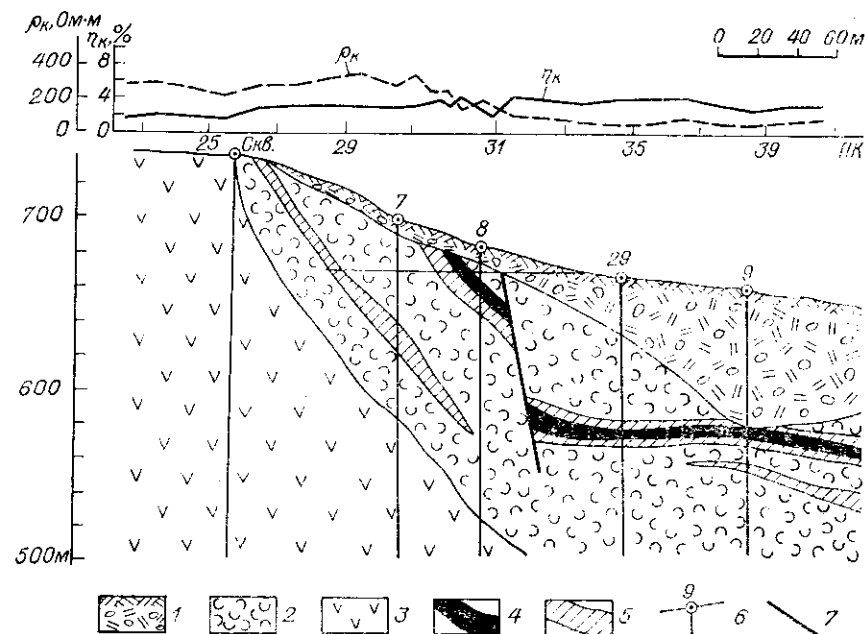


Рис. 137. Графики  $\eta_k$  и  $\rho_k$  срединного градиента над гематитовым месторождением в Грузии.

1 — делювиальные отложения; 2 — туфы; 3 — альбитофиты и порфириды; 4 — промышленные гематитовые руды; 5 — бедные руды; 6 — скважина и ее номер; 7 — тектоническое нарушение.

ВП, который может служить для классификации магнитных аномалий, обычно многочисленных над рудовмещающими габброидными породами. Хорошие результаты на ильменито-магнетитовом рудопроявлении получили в Белоруссии А. П. Ерышев и Л. И. Родионов. Их работы выполнены в условиях Русской платформы при мощности осадочных пород, перекрывающих рудоносную интрузию, 100—150 м. Для повышения разрешающей способности метода ВП белорусские геофизики удачно использовали скважинные варианты (заряд и азимутальную съемку), а для борьбы с помехами — фазовые измерения на переменном токе [287].

Поведение гематитовых руд разнообразно. Иногда они не обладают значительной избыточной поляризуемостью и аномалиями ВП не отмечаются. Примером служит Саркинетское железорудное месторождение в Грузии, которое приурочено к верхнемеловым вулканическим породам, подвергшимся интенсивным гидротермальным изменениям. За счет пиритизации рудовмещающие туфы имеют несколько повышенную поляризуемость и создают высокий фон — в среднем 4%. Такими же оказались и значения  $\eta_k$  над рудными телами (рис. 137). Локальные аномалии ВП не обнаружены на профилях, пройденных над месторождением, и в штольне,

пересекающей рудное тело. В пределах медноколчеданных и полиметаллических рудных полей на Южном Урале, в Центральном Казахстане и других районах встречены аномалии  $\eta_k$ , связанные с зонами гематитовой минерализации. В таких зонах сульфидная вкрапленность отсутствовала или была слишком слабой, чтобы объяснить наблюдаемые эффекты ВП. Среди разновидностей гематита маггемит имеет высокие значения магнитной восприимчивости, электрической проводимости и поляризуемости. Однако (помимо маггемита) имеется гематит, обладающий низкой магнитной восприимчивостью и высокой поляризуемостью. Автор наблюдал высокую поляризуемость (15—25%) у образцов немагнитного гематита из Центрального Казахстана.

И. С. Чуприн исследовал гематитовое рудопроявление в Восточном Казахстане и обнаружил интенсивное поле ВП при слабом магнитном поле. Гематитовые руды залегают согласно с вмещающими породами в так называемом железорудном горизонте, в составе которого основную роль играют вулканогенно-осадочные породы и липаритовые порфиры. Генезис руд предположительно вулканогенно-осадочный и гидротермально-метасоматический. Состав руд — гематитовый с валовым содержанием железа от 26 до 42%. Мощность рудных тел от первых метров до 45 м, протяженность от 20 до 400 м. Над гематитовыми рудными телами  $\eta_k$  достигает 12% при фоне 1—3% (режим измерений:  $t_3 = 10$ ,  $t = 0,3$  с). Аномалия  $\eta_k$  прослежена по простиранию на 1200 м.

Магнитная восприимчивость гематитовых руд  $\chi = (60 \div 300) \cdot 10^{-6}$ , плотность  $\delta = 3,20 \div 4,05$  г/см<sup>3</sup>, поляризуемость  $\eta = 21 \div 51\%$ . По текстурным и структурным особенностям выделяют слоистые, пльчатые и брекчиевые гематитовые руды. Все они сложены плотным тонкозернистым, иногда тонкозернистым гематитом. Метасоматический таблитчатый гематит замещает магнетит. Рентгеноструктурный анализ на установке УРС-60 показал, что в гематите имеется лишь незначительное количество магнезиоферрита ( $\text{Fe}_2\text{O}_3 + \text{MgFe}_2\text{O}_4$ ). И. С. Чуприну не удалось выяснить, какой именно структурой гематита обусловлена высокая поляризуемость.

С ролью гематита связывают высокую поляризуемость некоторых песчаников [333]. По-видимому, гематит обусловил аномалии  $\eta_k$  над фосфоритовым месторождением в Забайкалье. Аналогичные аномалии можно ожидать и над многими другими осадочными месторождениями.

В заключение несколько слов о серпентинитах Южного Урала. Первоначальные полевые измерения и исследования образцов, выполненные в режиме  $t_3 = 2$  мин,  $t = 0,5$  с, показали, что серпентиниты, обогащенные вторичным магнетитом и пирротинном, обладают высокой поляризуемостью (до 50%) и отмечаются аномалиями  $\eta_k$  до 10—30%, затухающими эффектами ВП рудных тел, приуроченных к тем же серпентинитовым массивам [156]. Вместе с тем организованные О. М. Шаповаловым исследования

временных характеристик ВП показали, что постоянная времени ВП серпентинитов значительно меньше, чем колчеданных руд, и по этому признаку их можно уверенно различать [307]. Содержащие магнетит серпентиниты, не подвергшиеся воздействию процессов рудообразования, имеют относительно низкую поляризуемость. Повышение ее свидетельствует о рудообразовании. Протяженные аномалии кажущейся поляризуемости, приуроченные к серпентинитовым массивам, могут служить поисковым признаком при мелкомасштабных съемках.

Поляризуемость марганцевых руд и практические возможности метода ВП на месторождениях Центрального Казахстана исследовали сотрудники Ленинградского университета [104—106]. Поляризуемость измерена на установке, показанной на рис. 25, при  $t_3 = 2 \div 3$  мин,  $t = 0,5$  с. Из 200 образцов 130 приходятся на окисленные руды. Образцы замачивали в 0,1 н растворе NaCl, чтобы имитировать состав подземных вод, характерный для участков Атасуйского рудного района, где были взяты образцы. В итоге измерений получены следующие значения поляризуемости, %:

|                                                                                |       |
|--------------------------------------------------------------------------------|-------|
| Пирролизит                                                                     | 80—98 |
| Манганит                                                                       | 15—33 |
| Гаусманит                                                                      | 10—12 |
| Псиломелановые руды                                                            | 30—49 |
| Руды смешанного состава (псиломелано-браунитовые и псиломелано-пирролизитовые) | 22—63 |

Поляризуемость руд зависит главным образом от содержания пирролизита и псиломелана, а также от текстуры электропроводящих включений. Для псиломелано-браунитовой руды зависимость  $\eta^*$  от весового содержания Mn близка к линейной. Коэффициент пропорциональности между ними составляет 0,6—1,5, в среднем 0,8. Минимальные значения  $C_m$  соответствуют земным разностям руд.

Все месторождения первичных окисных марганцевых руд и месторождений карбонатных, силикатных и окисленных руд, приуроченных к развитой коре выветривания, являются благоприятными объектами для метода ВП, если в состав руд входят перечисленные в табл. 1 и 28 электропроводящие марганцевые минералы.

На рис. 138 приведены примеры результатов работ на месторождении в Центральном Казахстане. На участке Клыч, где псиломелано-браунитовые руды залегают среди углистых аргиллитов, аркозовых песчаников и конгломератов, кажущаяся поляризуемость достигла 11—13% при фоновых значениях 2—3%. На Ушкатыне, где марганцевые руды перекрыты слоем третичных глин мощностью 45 м,  $\eta_k$  достигла 12% при фоне 2—4%. Повышенные фоновые значения (3—4%) приурочены к углистым породам, отмечаемым также пологими аномалиями естественного

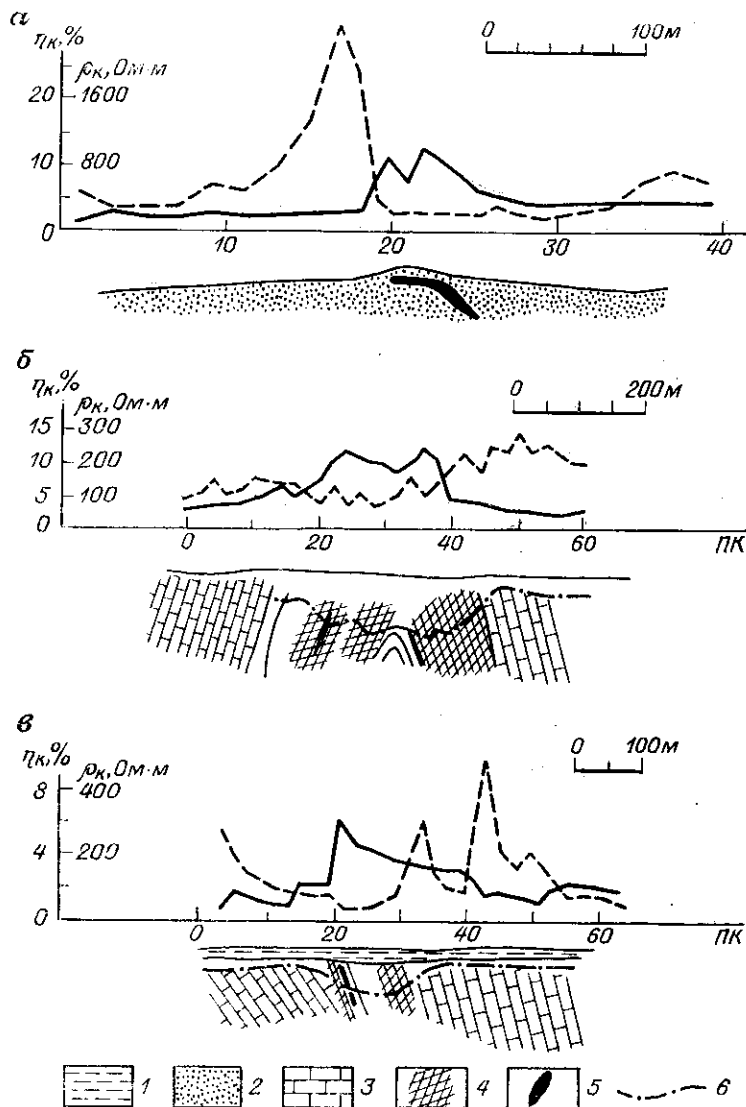


Рис. 138. Графики  $\eta_k$  и  $\rho_k$  срединного градиента над марганцевыми месторождениями (по Ю. Т. Ильину [104]).

Участки: а — Клыч, АВ = 800 м, МN = 20 м; б — Ушкаты, АВ = 1100 м, МN = 20 м; в — Камыс.  
1 — рыхлые отложения; 2 — углистые аргиллиты, песчаники; 3 — углисто-кремнистые известняки; 4 — продуктивная свита; 5 — рудные тела; 6 — граница коры выветривания.

электрического поля. Ю. Т. Ильин [104] положительно оценил перспективы метода ВП, указав, что он может оказать существенную помощь при поисках и разведке марганцевых месторождений.

На казахстанских месторождениях геологическая ситуация благоприятствует постановке метода ВП, поскольку углефикация околорудных пород незначительна. В других районах, где породы подверглись большому метаморфизму и сопровождающей его углефикации, следует ожидать определенных затруднений в истолковании аномалий ВП. Автору известен случай на Урале, когда интенсивная и широкая аномалия ВП охватывала всю толщу рудовмещающих углистых пород, внутри которой выделить локальную рудную аномалию не представилось возможным.

С другой стороны, выявление омарганцованных и графитизированных пород может служить благоприятным признаком при поисках иных месторождений. В. Н. Базаров и И. П. Степанов [17] отметили, что в Таджикистане такие породы сопровождают скрытые зоны дробления, с которыми связаны проявления полиметаллов, сурьмы и золота. Для отделения рудоносных зон от углистых сланцев, широко распространенных среди нижнепалеозойских осадочно-метаморфических пород, использовали данные литохимической съемки.

На марганцевом месторождении в Марокко хорошие результаты получили французские геофизики [335, 336].

#### Хром

На большинстве хромитовых месторождений применение метода ВП не имеет большого смысла, потому что хромит не является электронным проводником, но обладает высокой плотностью и обычно хорошо выявляется с помощью гравитационных методов. Исключение представляют некоторые месторождения, расположенные в горной местности, где применение гравитационных методов затрудняется необходимостью точного учета рельефа. К числу таких относится Шоржинское месторождение в Армении, на котором проведены работы в 1963 г. [54].

На этом месторождении рудные тела позднемагматического типа залегают среди дунитов и содержат значительную вкрапленность магнетита. Хромитовые руды в основном вкрапленные и полосчатые, реже — массивные. Содержание магнетита в богатой хромитовой руде составляет 11—26%, титаномagnetита 5—10%, поляризуемость руды достигает 30—32%. За счет магнетита бедные хромитовые руды имеют поляризуемость 10—14%.

Мощность рудных тел колеблется от 0,5 до 5 м, но мощность обогащенных магнетитом измененных дунитов достигает 20—60 м, благодаря чему создаются четкие аномалии ВП. В качестве примера на рис. 139 приведены графики  $\eta_k$  и  $\rho_k$  срединного градиента и вертикального зондирования над рудной зоной. На том же профиле выполнены измерения с разным положением токового электрода (рис. 97, б). Над зоной кажущаяся поляризуемость достигла

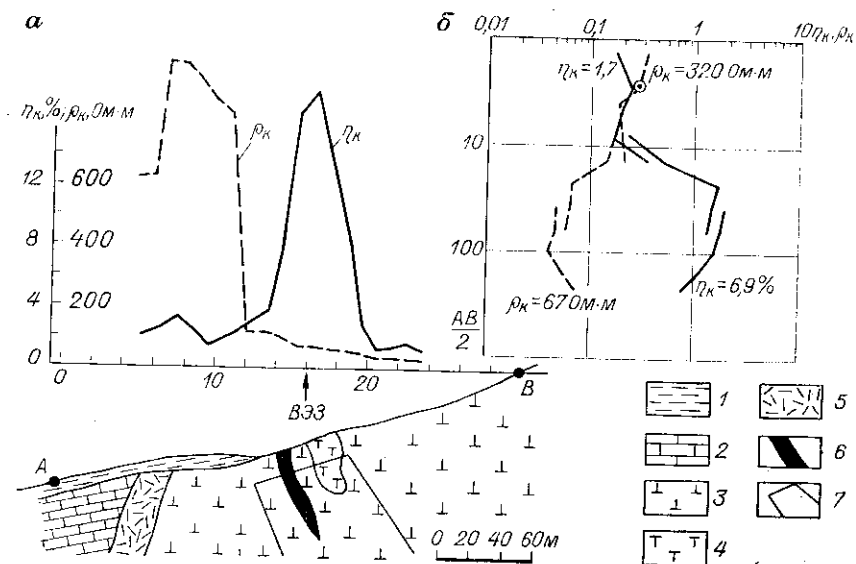


Рис. 139. Графики  $\eta_k$  и  $\rho_k$  срединного градиента (а) и вертикального симметричного зондирования (б) над хромитовым месторождением в Армении (по Г. О. Газаряну [54]).

1 — рыхлые отложения; 2 — известняки; 3 — дуниты; 4 — перидотиты; 5 — листвениты; 6 — хромитовое рудное тело; 7 — контур возмущающего тела по данным метода ВП.

18% при ширине аномалии 60 м и глубине поляризуемого тела, определенной по результатам ВЭЗ, 15 м. Поляризуемость рудной зоны составляет примерно 30%. На графиках  $\rho_k$  значениями менее 100 Ом·м отметились каолинизированные и серпентинизированные рудовмещающие дуниты, сопротивление которых, как показали исследования образцов, ниже сопротивления хромитовых руд.

Аномалии ВП отмечены на двух других профилях, проходящих над хромитовыми телами. Их интенсивность коррелировалась с уменьшением степени изменений дунитов. В этих условиях метод ВП полезен для выявления и оконтуривания рудовмещающих измененных дунитов, и тем самым для поисков перспективных участков, на которых можно сосредоточить детальные поисково-разведочные работы.

Известный зарубежный геофизик Д. Параснис [390], исследуя возможности геофизических методов, пришел к выводу, что хромитовые рудные зоны можно выявить с помощью гравиразведки, электроразведки на переменном токе (100—1000 Гц) и метода ВП. При этом он сослался на положительные результаты, полученные при поисках хромитов в Швеции.

## Титан

Условия работ и перспективы метода ВП на магматических титаномагнетитовых месторождениях охарактеризованы при описании месторождений железа. Опыта работ методом ВП на титановых россыпях и корях выветривания еще нет, хотя и здесь можно рассчитывать на определенный успех.

## МЕСТОРОЖДЕНИЯ ЛЕГКИХ МЕТАЛЛОВ

К этой группе относятся месторождения алюминия и магния. Пока имеются только работы, освещающие перспективы метода вызванной поляризации при поисках бокситов, являющихся главным видом сырья для получения алюминия.

## Алюминий

Югославский геофизик Ф. Шуми [413], исходя из различий «мембранной» поляризации в глинистых и прочих породах, первым наметил перспективу использования метода ВП при поисках не только подземных вод, каолина, бентонита и других глин, но и бокситов.

Физические свойства бокситов, в том числе их поляризуемость, изучали Н. Е. Гайдуков и М. В. Семенов [55]. Они установили, что у каменистых разностей бокситов поляризуемость составляет 3—4%, между тем как у пород, слагающих ложе и прибортовые части бокситовых депрессий, 1,1—2,0%, а у всех разновидностей глин и элювия коры выветривания — только 0,9%. У глинистых и рыхлых бокситов поляризуемость колебалась в пределах 1,8—3,2% и была выше, чем у прочих пестроцветных отложений (около 1%) и четвертичных глин. Полученные данные легли в основу рекомендации применения метода ВП при изучении бокситовых площадей.

В. А. Дубов [91] описал работы на Северном Урале в специфических условиях, когда залегающие на неровной поверхности рифогенных известняков бокситы перекрыты битуминозными известняками, содержащими вкрапленность пирита. Аномалиями  $\eta_k$  до 12—30% отмечаются наклоннозалегающие и выходящие к дневной поверхности пласты пестроцветных бокситов и контактирующие с ними пиритизированные известняки (рис. 140).

Параметрические измерения в выработках и исследования 150 образцов пород и бокситовых руд показали, что красные бокситы обладают в основном низкими значениями поляризуемости (до 2%), но иногда встречаются образцы с поляризуемостью до 15%, вероятно обусловленной включениями пирита. Пестроцветные бокситы имеют поляризуемость от 3 до 37%, примерно такую же, что битуминозные пиритизированные известняки. Поляризуемость рифогенных известняков колеблется в зависимости от содержания пирита от 1 до 12%. Эффузивы основного состава, плитчатые известняки, битуминозные и рифогенные известняки вдали от рудных

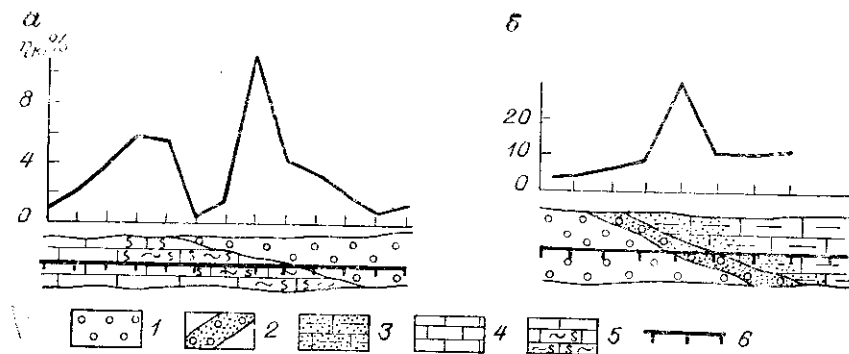


Рис. 140. Графики  $\eta_k$  срединного градиента над месторождением бокситов (по В. А. Дубову [91]).

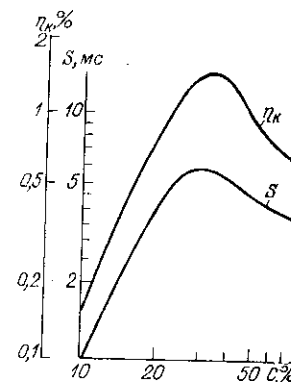
Участки: а — Черемухово, б — Красная Шапочка;  $AB = 15$  м,  $MN = 2$  м.  
1 — красные маркитовые бокситы; 2 — пестроцветные бокситы; 3 — битуминозные известняки с вкрапленностью пирита; 4 — рифогенные петропавловские известняки; 5 — рифогенные с пиритовыми прожилками известняки; 6 — линия наблюдений и точки на ней.

тел имеют поляризуемость не выше 2,5%. В конечном итоге В. А. Дубов пришел к выводу, что продуктивная толща в разрезе североуральской бокситовой формации в достаточной мере выделяется повышенной поляризуемостью среди вмещающих пород и метод ВП можно широко применять при поисках бокситов рассмотренного типа.

Итальянские геофизики [357] исследовали влияние объемного содержания пизолитов на поляризуемость известковых бокситов. Предварительно они изучили гранулометрический состав пизолитового боксита и установили, что 80% его объема занимают пизолиты диаметром от 5 до 15, а остальную часть — диаметром 15—20 мм и более. Содержание мелкой фракции составляло менее 2%. Боксит практически содержится только в пизолитах, поэтому, смешивая в заданной пропорции мелкую фракцию исходной пробы и пизолиты размером 10—15 мм, авторы воспроизводили примерный состав бедных и богатых руд. При этом учитывалось, что минимальное содержание пизолитов в руде равно 10%.

Поляризуемость измерена в режиме разнополярных импульсов тока, длительность которых была равной паузам и составляла обычно 20 с. В специальных опытах с тремя образцами была снята зависимость от длительности импульсов, оказавшаяся разной при различном содержании пизолитов. С помощью осциллографа на ленту записывали кривые спада напряжения ВП, которые затем разлагали на сумму трех экспонент с постоянными, в среднем равными 1,5; 0,06 и 0,006 с. Преобладала самая медленная экспонента. Кроме того, вычислен интеграл спадающего напряжения ВП в интервале от 0,02 до 0,5 с, который непосредственно измеряется в распространенной за рубежом аппаратуре канадской фирмы

Рис. 141. Зависимость поляризуемости  $\eta_k$  и заряжаемости  $S$  от объемного содержания пизолитов в бокситовой руде [357].



«Синтрекс». Отношение интеграла ВП к  $\Delta U_{пр}$  зарубежные геофизики называют заряжаемостью (chargeability) [405].

Зависимость поляризуемости \* и заряжаемости образцов от содержания пизолитов приведена на рис. 141. Оба параметра резко возрастают при увеличении концентрации пизолитов вплоть до 30—40%, после чего наблюдается некоторое уменьшение поляризуемости, хотя она остается в 4 раза выше, чем у образца без пизолитов.

Полевые работы с канадской аппаратурой провели другие итальянские геофизики [346]. Пизолитовые бокситы на юге Италии приурочены к карстовым «карманам» среди известняков мелового возраста. Изученные бокситоносные «карманы» имеют в плане примерно эллиптическую форму с осью 200—300 м. Дно «карманов» неровное, максимальная глубина его 40 м. Они заполнены красномземом, глиной и бокситом, находящимся в виде пизолитов и желваков диаметром от 1 до 40 мм. Весовое содержание пизолитов составляет от 5 до 55% (содержания менее 5% непромышленные). Сверху «карманы» перекрыты четвертичными мергелями мощностью до 2—5 м.

Работы методом ВП проведены по схеме симметричного вертикального зондирования. Интерпретация ВЭЗ ВП дала следующие значения удельного сопротивления и поляризуемости (при  $t_3 = 1,5$  с,  $t = 0,2$  с):

| Порода                | $\rho$ , Ом·м | $\eta$ , % |
|-----------------------|---------------|------------|
| Гумус                 | 50—300        | 0,006—0,13 |
| Глина                 | 15—28         | 0,032—0,26 |
| Мергель               | 45—54         | 0,75—1,02  |
| Выветрелые известняки | 24—135        | 0,09—0,83  |
| Меловые известняки    | 600—1500      | 0,04—0,22  |
| Бокситы               | 17—28         | 0,64—12,0  |

Поляризуемость оказалась тем больше, чем выше концентрация пизолитов. В целом итальянские геофизики пришли к выводу, что метод ВП можно успешно применять для поисков пизолитовых бокситов, которые по удельному сопротивлению не выделяются среди глин. Положительные результаты дало также опробование метода ВП на бокситовых месторождениях Франции и Румынии

\* Авторы статьи не дали значений поляризуемости, но все необходимые для ее вычисления сведения приведены в статье и использованы при составлении рис. 141.

[417]. Над бокситовыми залежами, находящимися среди мергелей и известняков, получены аномальные значения  $\eta_k$  до 10% при фоне 1—1,5%.

Судить о причине повышенной поляризуемости бокситов пока можно лишь предположительно. Иностранные исследователи связали ее с мембранной ВП глин [417]. Автор совместно с К. Г. Шубниковой исследовал образец боксита, предоставленный венгерскими коллегами. Полученная переходная характеристика ВП приведена на рис. 108. Обращает на себя внимание исключительно большая поляризация боксита в миллисекундном диапазоне времени. Проще всего ее приписать наличию в боксите каких-то мелких электропроводящих включений.

Помимо прямых поисков бокситов метод ВП может быть использован для оконтуривания тектонических зон смятия и глубинных разломов, с которыми связано образование мощной коры выветривания. Э. Ф. Запорожский и Н. А. Гладков [101] отметили, что сульфидизация таких зон усиливает процессы выветривания за счет появления серноокислотных растворов, образующихся при разрушении пирита и других сульфидов. Геологи, работающие на Урале, в Казахстане и Салаире, связывают бокситообразование с процессами выветривания сульфидизированных алюмосиликатных пород и отмечают, что размещение бокситового оруденения контролируется дорудными сбросами [91, 101].

## МЕСТОРОЖДЕНИЯ ЦВЕТНЫХ МЕТАЛЛОВ

Подавляющее большинство месторождений цветных металлов сложено электропроводящими сульфидами. Исключение представляют лишь силикатные никелевые и сурьмяные руды, но и им сопутствует пирротиновая или пиритовая вкрапленность. Это предопределяет широкие возможности метода ВП на различных стадиях поисковых и разведочных работ.

Исторически дело сложилось так, что метод ВП первоначально разрабатывался как средство расшифровки аномалий метода сопротивлений и выявления среди них связанных с электронными проводниками [221, 245]. Позднее, когда была доказана высокая чувствительность метода ВП к сульфидной вкрапленности, его стали применять в качестве самостоятельного поискового метода, дающего информацию одновременно о сопротивлении пород и их поляризуемости [125, 127, 130].

Из-за громоздкости аппаратуры и высокой стоимости работ по сравнению с другими методами электроразведки метод ВП больше всего применяется на стадии поисков при масштабах съемок 1 : 25 000 и 1 : 10 000. Более крупные масштабы обычно нецелесообразны, поскольку аномалии ВП, охватывающие рудные зоны в целом, имеют протяженность не менее сотен метров. Напротив, в ряде районов полезно проводить мелкомасштабные поисковые работы (1 : 50 000 или 1 : 100 000) или даже маршрутную съемку

для выявления рудоконтролирующих структур и зон развития рудной минерализации, соответствующих рудным полям. На Алтае, Урале, Кавказе, Кольском полуострове, в Казахстане и в Средней Азии обнаружены интенсивные «региональные» аномалии ВП длиной до десятков километров [27, 57, 112, 113, 188, 216, 224, 236].

Таковыми аномалиями ВП отмечаются региональные разломы, игравшие роль рудоподводящих каналов, и зоны контактового метаморфизма, окружающие крупные интрузивные тела, с которыми во многих случаях связано образование полезных ископаемых.

На медных и полиметаллических месторождениях, как на главных объектах практического применения, опробованы все разновидности аппаратуры метода вызванной поляризации. Число соответствующих публикаций достигает сотен наименований, поэтому приходится ограничиться кратким обзором результатов работ и ссылками на литературу.

### Медь

Широкое опробование метода ВП на медных месторождениях сотрудники ВИТР провели в 1957 г. Совместно с местными геофизиками исследования были выполнены на медноколчеданном месторождении в Грузии, медно-молибденовом в Центральном Казахстане и медно-никелевых на Кольском полуострове. Во всех случаях были получены благоприятные результаты, послужившие толчком для внедрения метода ВП в производственную практику [204].

В качестве примера служат материалы опытных работ в Грузии, отчасти уже рассмотренные (рис. 93 и 95). Маднеульские месторождения приурочены к верхнемеловым туфам, подвергшимся интенсивным гидротермальным изменениям: окварцеванию, каолинизации, серицитизации, хлоритизации и пиритизации. Рудовмещающие породы превратились во вторичные кварциты, повсеместно несущие вкрапленность пирита и потому обладающие повышенной поляризуемостью (в среднем 4%). Барит-полиметаллическое и медноколчеданное месторождения расположены вблизи друг друга, но разделены тектоническими нарушениями и существенно различаются по минералогии и текстуре руд. Полиметаллическое оруденение выходит под небольшие наносы. Мощность зоны окисления невелика, и хорошо проводящие руды, сложенные галенитом, сфалеритом, пиритом и халькопиритом, отмечаются четкими аномалиями естественного электрического поля и метода сопротивлений.

Медноколчеданное оруденение, представленное вкрапленными пирито-халькопиритовыми рудами, расположено на глубине 25—85 м и со стороны кровли ограничивается 2—3-метровым слоем тектонической глины. Выше залегают безрудные вулканогенные породы и делювиальные отложения. Это оруденение ни упомянутыми методами электроразведки, ни литохимической съемкой, вообще в районе весьма эффективной, не отмечено.

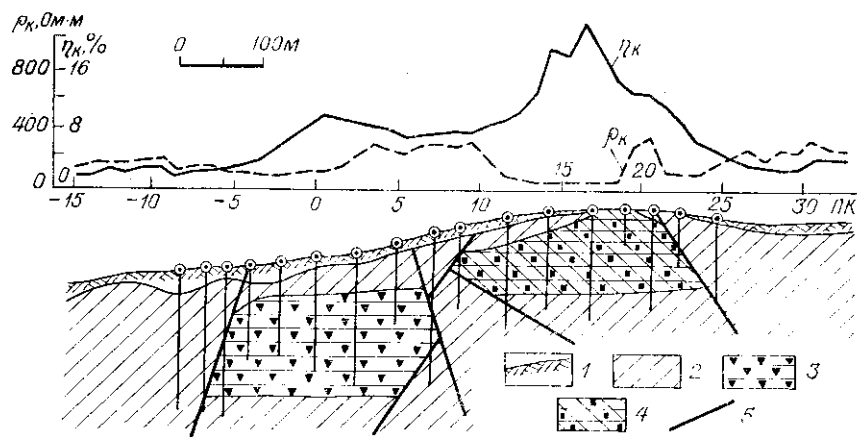


Рис. 142. Графики  $\eta_k$  и  $\rho_k$  срединного градиента над Маднеульским месторождением.

1 — почва и делювий; 2 — окварцованные кислые эффузивы, туфы и туфопесчаники; 3 — вторичные кварциты с вкрапленными медноколчеданными рудами; 4 — вторичные кварциты с барито-полиметаллическими рудами; 5 — тектонические нарушения.

По методу ВП на участке пройдено 10 профилей, пять из которых длиной по 1500 м пересекли оба месторождения, а остальные расположены над медноколчеданным месторождением. Разнос  $AB = 1000$  м,  $MN = 20$  м. Длинные профили сняты при двух последовательных положениях токовых электродов. На сводном плане графиков  $\eta_k$ , показанном на рис. 116, видны две аномальные зоны. Более интенсивная северо-западная расположена над барит-полиметаллическим месторождением. Юго-восточная характеризуется значениями  $\eta_k = 6 \div 12\%$  и расположена над медноколчеданным месторождением, при этом контур аномалии согласуется с контуром промышленного оруденения. На восточном фланге аномалия ВП сопровождается пиритовые вкрапленники во вторичных кварцитах.

Графики  $\eta_k$  и  $\rho_k$  срединного градиента по профилю, пересекающему оба месторождения, показаны на рис. 142. Полиметаллическое и медноколчеданное оруденение отмечается повышением кажущейся поляризуемости соответственно до 20 и 9%. Над полиметаллическим наблюдается понижение кажущегося удельного сопротивления до 50 Ом·м, в то время как над вкрапленным медноколчеданным оруденением значения  $\rho_k$  остаются примерно такие же, что и за пределами месторождений (100—200 Ом·м). Такое же соотношение  $\eta_k$  и  $\rho_k$  получено при вертикальных зондированиях. Зондирования, выполненные в центре медноколчеданного месторождения, показали, что при малых разносах  $AB$   $\eta_k = 0,4 \div 1,0\%$ , что соответствует низкой поляризуемости рыхлых отложений. Лишь при  $AB = 200$  м и более кажущаяся поляризуемость возрастает до 7—10% (рис. 118). Этим демонстрируется

связь аномалии ВП с глубокозалегающими рудами. При зондированиях за пределами месторождений над гидротермально измененными породами и на максимальных разносах 1000 м  $\eta_k = 4\%$ .

В 1959 г. при участии автора проведены первые опытно-производственные работы на Южном Урале. Они сразу же привели к выявлению на двух участках интересных аномалий, буровая проверка которых показала их связь с медноколчеданным оруденением [301]. Один из участков призван перспективным, детально изучен методом ВП и разведан с помощью скважин. В итоге открыто промышленное медноколчеданное месторождение и доказаны прежде спорные перспективы района Челябинской области [301—303]. Вскоре в том же районе открыто еще одно, более крупное месторождение, залегающее под 50—90-метровым слоем мезо-кайнозойской коры выветривания. Графики  $\eta_k$  и  $\rho_k$  срединного градиента над этим месторождением приведены на рис. 130, а. В процессе его разведки использованы скважинные варианты метода ВП, позволившие оконтурить месторождение и дать направление буровым работам [11].

Первое из упомянутых месторождений приурочено к крылу брахиантиклинальной складки, расположенной в пределах восточного борта Магнитогорского синклинория в полосе диабазо-альбитофирового комплекса пород девонского возраста. Рудовмещающими являются кварцево-хлоритово-серицитовые породы, образовавшиеся за счет метаморфизма альбитофиров и их туфов, заполняющих ядерную часть антиклинали. Еще выше залегают разнообразные вулканогенные породы и известняки. На месторождении имеется несколько рудных тел, локализованных вблизи тектонических нарушений. Руды состоят из пирита, халькопирита, сфалерита и иногда борнита, окруженных ореолом пиритовой вкрапленности. В скв. 9, показанной на рис. 143, сплошные колчеданные руды занимают 4, вкрапленные 17, а общая мощность минерализованной зоны достигает 70 м. Подобные соотношения типичны для месторождения и дают объяснение высокому эффекту вызванной поляризации.

Баритизация, окварцевание и вкрапленный характер оруденения в верхней части рудной зоны обусловили относительно небольшую аномалию электрической проводимости. При электрическом поле, заданном вкрест простираения зоны, над ней наблюдается повышение  $\rho_k$  (рис. 143, а). Но если поле задано вдоль простираения или вдоль падения зоны, то обнаруживается существенное уменьшение  $\rho_k$ , связанное с высокой электрической проводимостью сплошных и прожилковых руд (рис. 125, а и 143). Одновременно возрастает и кажущаяся поляризуемость. Это закономерное изменение аномалий  $\eta_k$  и  $\rho_k$ , теоретически рассмотренное в гл. II, использовано О. М. Шаповаловым [304] в качестве признака наличия богатых руд при оценке аномалий ВП.

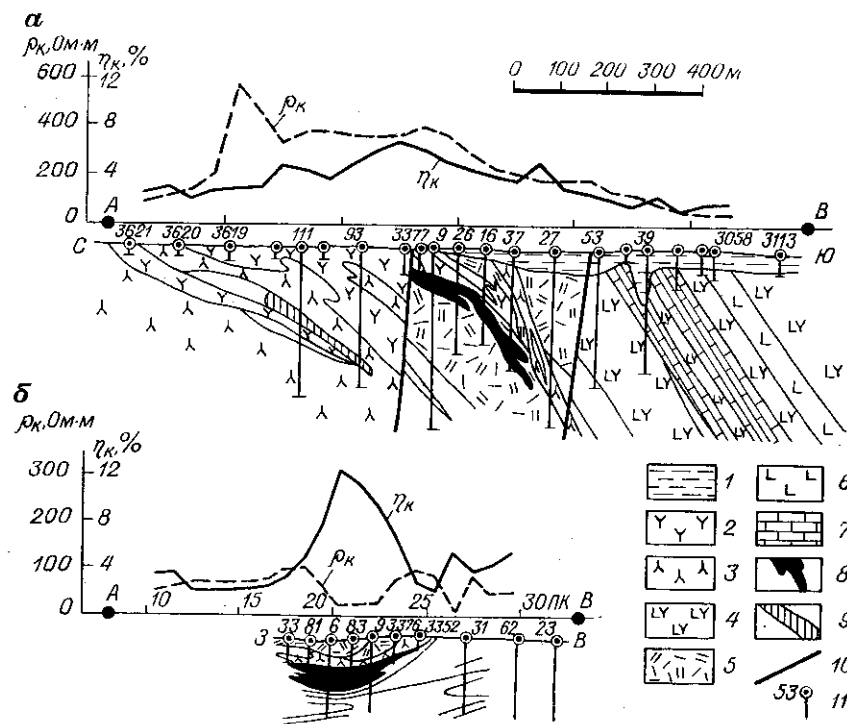


Рис. 143. Графики  $H_k$  и  $B_k$  срединного градиента над медноколчеданным месторождением на Южном Урале (по О. М. Шаповалову [304]).

По профилю: а — вкост простирания рудного тела ( $AB = 1500$  м,  $MN = 50$  м), б — вдоль простирания рудного тела ( $AB = 1000$  м,  $MN = 20$  м). 1 — рыхлые отложения; 2 — дацитовые порфиры; 3 — порфиры нерасчлененные; 4 — андезито-дацитовые порфиры; 5 — серицито-хлоритовые породы; 6 — диабазы; 7 — известняки; 8 — вкрапленные и сплошные промышленные руды; 9 — вкрапленные непромышленные руды; 10 — тектонические нарушения; 11 — скважина и ее номер.

Об эффективности применения метода ВП можно судить по следующим данным производственных работ. В 60-е годы поисковая съемка методом ВП выполнена на площади  $15 \text{ км}^2$  по сети  $250 \times 50$  м с детализацией аномалий по сети  $(100 \div 125) \times 50$  м. Выявлено 22 локальные аномалии ВП, из которых 10 рекомендовано к проверке глубокими скважинами, бурение привело к открытию всех основных тел месторождения. При этом стоимость буровых работ составила 140 тыс. руб., а работ методом ВП — 45 тыс. руб.

На той же площади по данным геологического картирования выделена перспективная зона длиной 3,6 и шириной 1,6 км. Описывание этой зоны без учета геофизических данных потребовало бы бурения 108 скважин (по сети  $400 \times 200$  м со сгущением до  $200 \times 200$  м в наиболее интересных местах) общей стоимостью 540 тыс. руб. Если этим затратам противопоставить фактические

затраты на бурение (140 тыс. руб.), на метод ВП (45 тыс. руб.) и на другие геофизические методы (55 тыс. руб.) \*, сумма которых 240 тыс. руб., то разность составит 300 тыс. руб.

На стадии предварительной разведки месторождений из 15 скважин, рекомендованных с учетом скважинных исследований методом ВП для изучения основного рудного тела, 9 вскрыли медноколчеданные руды, 4 — серные колчеданы, 2 заданы за пределами аномалии для оконтуривания тела.

Всего за 4 года на территории Челябинской области съемка по методу ВП была выполнена на площади  $1200 \text{ км}^2$  (сеть  $250 \times 50$  и  $500 \times 50$  м). На этой перспективной по геологическим данным площади аномалии ВП охватили  $113 \text{ км}^2$ , т. е. примерно 10% изученной территории. Над всеми известными промышленными месторождениями Южного, Среднего и Северного Урала, залегающими на глубинах до 100—120 м, во время опытных работ установлены аномалии кажущейся поляризуемости \*\*. Вместе с тем не отмечено ни одного случая, чтобы на «пустой» по данным метода ВП площади было обнаружено практически важное оруденение на глубинах до 100 м.

При разведке месторождений применялись скважинные методы электроразведки, в том числе и метода ВП. Их эффективность имела, как отметили В. Е. Бабенков и О. М. Шаповалов в докладе на Всесоюзном геофизическом совещании в Красноярске (1965 г.), не столько явный экономический, сколько моральный характер. Геофизическое изучение рудоносности окоскважинного пространства, уточнение элементов залегания рудных тел и повышение качества документации разрезов скважин привело к сокращению риска заложения непроизводительных скважин и к увеличению степени разведанности месторождений. Экономического эффекта можно достигнуть, если не бурить некоторые скважины, излишние с точки зрения геофизиков. Но при подсчете запасов по высоким категориям геологи, стремясь получить максимальную достоверность данных о строении и составе рудных тел, не разрежают сеть скважин.

Показанная картина является, пожалуй, характерной для всех медноколчеданных провинций. Соотношение аномалий, отвечающих «пустым» пиритовым телам и медноколчеданным рудопоявлениям, в среднем составляет 3 : 1. Но из обнаруженных рудопоявлений только одна четвертая часть после предварительной разведки переходит в разряд месторождений, так что лишь одна из двенадцати аномалий ВП, выбранных в качестве наиболее

\* При изучении аномалий ВП использованы гравиметрическая съемка по сети  $100 \times 20$  м, магнитная съемка и разнообразные скважинные методы. В стоимость геофизических работ включены также все исследования методами электроразведки, которые на рассматриваемой площади велись с 1952 г.

\*\* Аномалия ВП установлена и над Комсомольским месторождением, залегающим на глубине 250 м. Ее причиной является ореол пиритовой вкрапленности, протягивающейся от рудного тела вверх.

надежных, приводит к открытию нового месторождения. Эти статистические данные предостерегают от попыток за каждой аномалией ВП видеть промышленную руду, а с другой стороны, дают определенную надежду на выявление месторождений при выполнении достаточно большого объема поисковых работ.

Перечисленные выводы основаны на знакомстве с результатами работ во многих районах. Среди соответствующих публикаций можно отметить статью В. В. Кормильцева и В. А. Сидорова [156], содержащую описание работ в Оренбургской области. Здесь на территории, представляющей геологам перспективной, съемкой методом ВП по сети  $200 \times 50$  м было покрыто несколько десятков квадратных километров. Среди многих тысяч точек с кажущейся поляризуемостью от 1 до 2,5% лишь на нескольких точках значения  $\eta_k$  повышались до 3—3,5%. Эти повышения приурочены к выходам эффузивных пород, несущих бедную сульфидную вкрапленность. К тем же породам приурочены и зоны устойчивого повышения фона поляризуемости с 1 до 2,5%. Глубокими структурно-поисковыми скважинами, пробуренными на той же территории, медноколчеданное оруденение не обнаружено.

На другом участке съемкой на площади  $30 \text{ км}^2$  выявлено несколько аномалий ВП, включающих известные рудопроявления и охватывающих площадь около  $2 \text{ км}^2$ . По этим данным намечены контуры зон сульфидной минерализации и значительно сужена территория дальнейших поисково-разведочных работ. Для выделения массивных колчеданов использованы гравитационная вариометрическая съемка и низкочастотный индуктивный метод АФИ. Скважина, заданная в центре комплексной аномалии, вскрыла под 30-метровым слоем аллювиальных отложений массивные сульфидные руды мощностью 18 м и прожилково-вкрапленное оруденение в лежащем боку рудного тела. Удачной была проверка и других рекомендаций геофизиков.

В Мугоджарах по данным метода ВП открыто первое в этом районе крупное медноколчеданное месторождение [68, 193]. Аномальные зоны ВП изучались с помощью метода переходных процессов. В итоге в Мугоджарах и прилегающем к ним районе Оренбургской области открыто несколько месторождений и выявлена новая меднорудная провинция [195, 213].

В Центральном Казахстане метод ВП с 1960 г. приобрел роль ведущего (наряду с литохимической съемкой) в поисковом комплексе [322]. Из пяти вновь выявленных медноколчеданных месторождений три открыты по данным метода ВП в комплексе с литохимией [323]. Положительные результаты дало применение метода ВП на Северном Урале [279], Северном и Большом Кавказе [57, 202, 293], на Южном и Рудном Алтае [182—185], в Армении [7, 15, 16], Сибири [214, 264].

На месторождениях меднопорфировых руд метод ВП зарекомендовал себя как необходимое дополнение к магнитной и лито-геохимической съемкам, нацеленным на выявление гидротермально

измененных пород и признаков рудной минерализации. Характерными являются результаты работ в Центральном Казахстане [68, 119]. В Узбекистане в Алмалыкском районе по данным метода ВП околочены две зоны, в пределах которых скважины встретили мощные интервалы вкрапленных медных руд [56, 201]. Успешно применяют метод ВП при поисках медно-магнетитовых скарновых месторождений в Южном и Центральном Казахстане [112, 113, 119]. Благоприятны условия для применения метода ВП при поисках медистых песчаников и жильных тел в Джезказганском районе [4, 48, 68].

Известная проблема разделения аномалий ВП, создаваемых медноколчеданными рудами и пиритизированными породами, начинает решаться благодаря анализу временных особенностей ВП и попутному использованию параметра становления электрического поля  $\delta$ , получаемого при измерениях ранней стадии вторичного поля. На рис. 144 приведены графики дифференциальной кажущейся поляризуемости  $\tilde{\eta}_k$  для разных моментов времени  $T$  над южноуральским месторождением (методика определения  $\tilde{\eta}_k$  описана в гл. IV).

Медноколчеданное месторождение залегает среди пиритизированных вулканогенных пород. Высокие значения кажущейся поляризуемости сопутствуют месторождению и околорудным породам. Имеющийся над месторождением локальный максимум  $\eta_k$  сам по себе не служит доказательством присутствия рудного тела. Соотношение графиков  $\tilde{\eta}_k$  для разных  $T$  над месторождением и над породами различно. Вне месторождения график  $\tilde{\eta}_k$  для самого большого времени  $T$  расположен ниже других графиков. Над месторождением этот график становится выше остальных, что означает, что время установления ВП медноколчеданной руды больше, чем пиритовых включений во вмещающих породах.

Второй пример взят из работ на медно-пирротиновом месторождении в Восточном Казахстане. Приведены графики дифференциальной кажущейся поляризуемости для двух моментов времени  $T_1$  и  $T_2$ , а также сдвига фазы ВП  $\Phi_{ВП}$  на частоте 1,22 Гц. Согласно теоретическим данным (см. гл. I), значение  $\tilde{\eta}_k$  сопоставимо с утроенным значением  $\Phi_{ВП}$ . Поэтому вертикальный масштаб графика  $\Phi_{ВП}$  на рис. 145 взят в 3 раза крупнее, чем  $\tilde{\eta}_k$ . Частоте 1,22 Гц соответствует время переходного процесса 0,2 с.

Аномалии  $\tilde{\eta}_k$  и  $\Phi_{ВП}$  однотипны и обусловлены прежде всего углисто-глинистыми (графитизированными) сланцами, приуроченными к рудоконтролирующему тектоническому нарушению и обладающими возле него высокой поляризуемостью. Во взаимоотношениях графиков для разных моментов времени обнаруживаются те же закономерности, что и в предыдущем примере южноуральского месторождения. Над рудными телами, отличающимися от сланцев медленным установлением поля ВП, дифференциальная

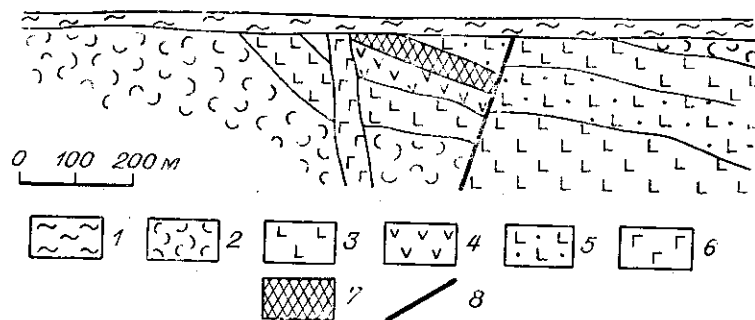
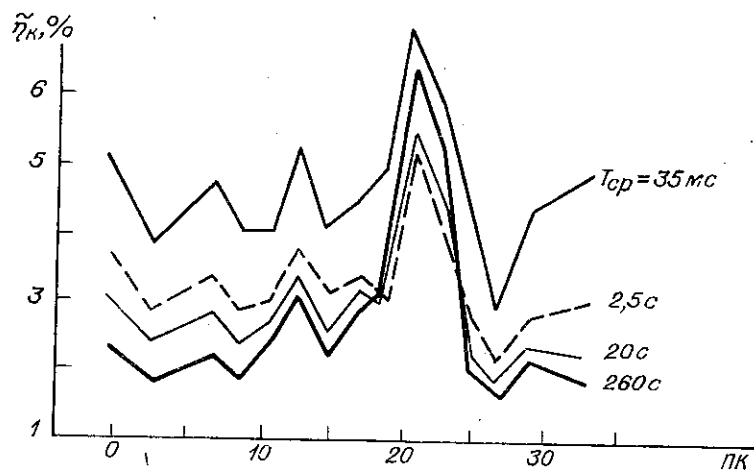
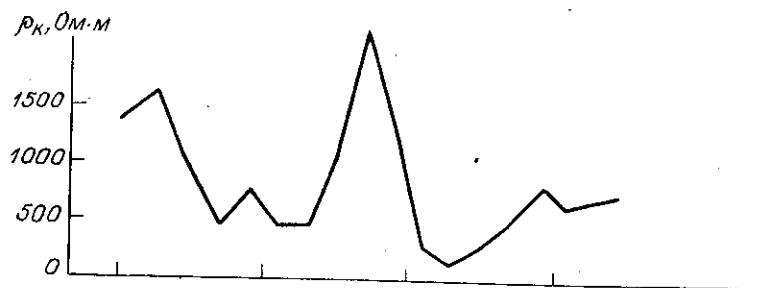


Рис. 144. Графики  $\rho_k$  и дифференциальной кажущейся поляризуемости  $\tilde{\eta}_k$  для разных моментов времени  $T$  над медноколчеданым месторождением на Южном Урале (по О. М. Шаповалову и В. В. Чернышу).

$T_{ср}$  — время переходного процесса ВП.

1 — рыхлые отложения; 2 — туфы; 3 — слиты; 4 — порфиристы; 5 — диабазы; 6 — габбро-диабазы; 7 — медноколчеданная руда; 8 — тектоническое нарушение.

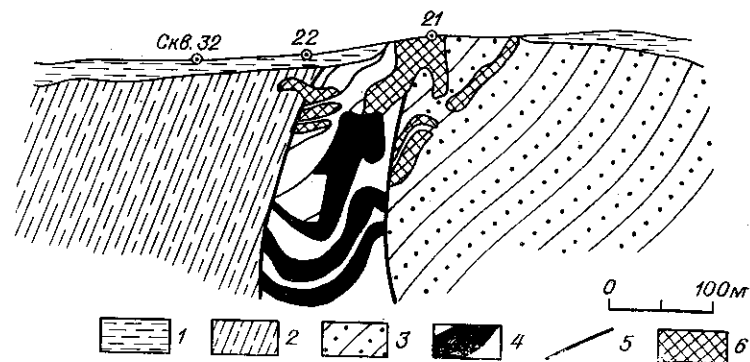
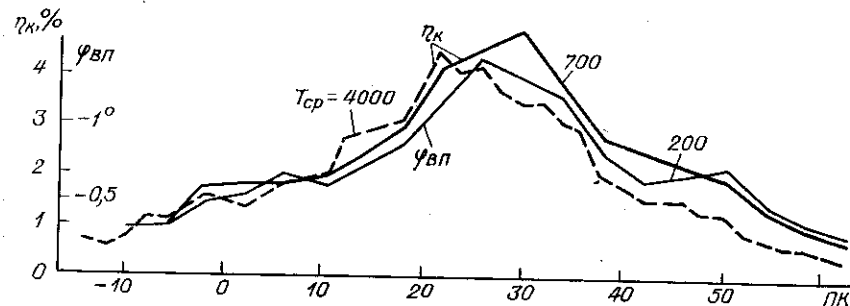
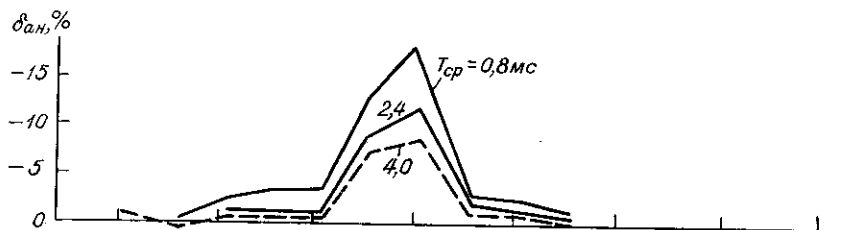
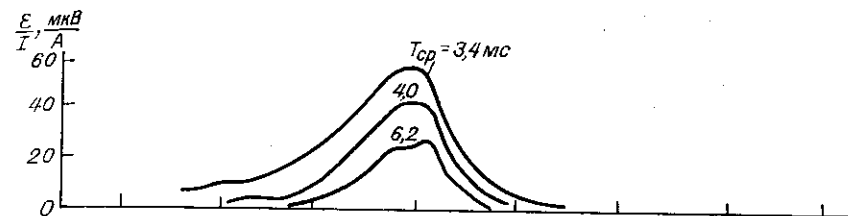


Рис. 145. Результаты работ по методу переходных процессов, становления электрического поля и ВП на медноколчеданном месторождении в Казахстане.

1 — рыхлые отложения; 2 — слюисто-кварцевые сланцы; 3 — углисто-глинистые сланцы; 4 — медно-пирротинные руды; 5 — тектонические нарушения; 6 — окисленные руды.

поляризуемость проявляет ясную тенденцию к росту по мере увеличения  $T$ . Напротив, над сланцами повсеместно  $\eta_k$  со временем уменьшается. Соответственно максимум  $\eta_k$  для малого  $T$  смещается вправо, в направлении выходов графитизированных сланцев.

Дополнительным признаком того, что левый максимум  $\eta_k$  связан с телом хорошо проводящих колчеданных руд, служат результаты измерений индукционным методом переходных процессов с аппаратурой МППУ-2 и измерений становления электрического поля с аппаратурой СВП-74. На рис. 145 приведены графики  $\mathcal{E}(t)/I$  для рамочно-петлевого варианта метода переходных процессов и аномальных значений параметра становления поля  $\delta$ . Сопоставляемые графики весьма похожи друг на друга.

Говоря о применении метода ВП за рубежом, следует отметить, что в западных странах при поисках рудных месторождений с 60-х годов метод ВП по объему работ (в денежном выражении) вышел на первое место среди геофизических методов [336, 355, 371]. Американские и канадские фирмы проводят работы не только в Северной Америке, но и в Австралии, Африке и Латинской Америке [358, 359, 370, 422]. Метод ВП сыграл видную роль при открытии медных месторождений в Австралии, Южной Родезии, Перу, Квебеке, Британской Колумбии и США. Согласно подсчетам П. Пембертона [393], относящимся к 1966 г., из 60 новых медных и полиметаллических месторождений 15 найдены с помощью метода ВП. Вслед за советскими геофизиками в последние годы финские, австралийские и другие зарубежные геофизики все шире и с успехом применяют в методе ВП схему заряженного тела [349]. Индийские специалисты [350] создают собственную аппаратуру для метода ВП и опробуют ее для поисков медных месторождений.

Особенно большое значение метод ВП приобрел при поисках меднопорфировых месторождений, проводимых по всему Тихоокеанскому поясу [358, 368, 392, 414, 415, 422]. Стратегия поисковых работ вытекает из получивших признание взглядов Дж. Ловелла, Дж. Гильберта и Р. Силлитоу [377, 409, 410] на происхождение меднопорфировых руд, увязываемое с теорией тектонических плит. Эти геологи, изучив месторождение Сан-Мануэл в штате Аризона, а затем несколько десятков других месторождений в США, Чили и Аргентине, пришли к выводу о закономерной повторяющейся зональности измененных пород и роли глубинных разломов при образовании месторождений этого типа.

На рис. 146 показана модель строения зон измененных пород и рудной минерализации. Вокруг интрузивного штока образуется несколько зон, имеющих примерно цилиндрическую форму. Внутри находится калиевая зона (преобладают кварц, ортоклаз и биотит), к периферии ее сменяют филлитовая (кварц, серицит, пирит), аргиллитовая (кварц, каолин) и пропилитовая (хлорит, эпидот, карбонаты).

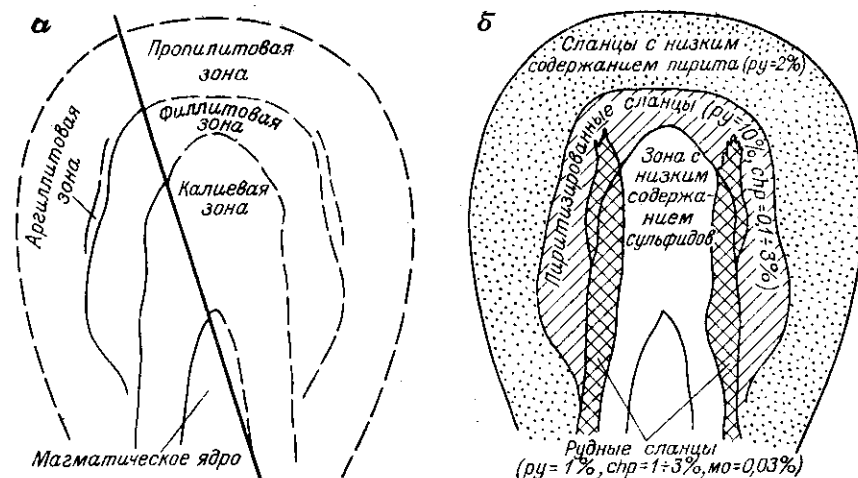


Рис. 146. Модель концентрического строения зон измененных пород (а) и рудной минерализации (б) вблизи глубинного разлома Сан-Мануэл, США (по Дж. Ловеллу и Дж. Гильберту [377]).

В центральном магматическом ядре имеется редкая вкрапленность магнетита и в меньшей мере пирита и халькопирита. Ядро окружает довольно мощная зона, сложенная кварцем, биотитом и характерными калиевыми полевыми шпатами; она содержит относительно бедную вкрапленность халькопирита, пирита и молибденита, а также мелкие прожилки сульфидов. В филлитовой зоне пиритовая вкрапленность достигает наибольшей концентрации (в среднем 10%). Наиболее важные медные и медно-молибденовые руды располагаются вблизи контакта филлитовой и пропилитовой зон. Здесь среднее объемное содержание халькопирита составляет 1—3, молибденита 0,03, пирита 1%. Рудные тела окружает пиритовый ореол, охватывающий филлитовую зону. Здесь концентрация пирита достигает 10, а содержание халькопирита 0,1—3%.

Во внешней пропилитовой зоне средняя концентрация сульфидов уменьшается, но в верхней части разреза появляются халькопирит-галенит-сфалеритовые жилы, содержащие золото и серебро. В нижней части разреза, близкой к магматическому ядру, в случае контакта с карбонатными породами развиваются скарны, обогащенные магнетитом и пиритом.

Геологи, работающие в странах Тихоокеанского пояса, нашли описанную модель подходящей для многих месторождений с уточнениями, касающимися возраста интрузий, их состава и глубины эрозионного среза. В. Пелтон и П. Смит [392], сравнивая месторождения Северной Америки и Филиппин, подчеркнули, что, хотя в первых относительно больше молибдена, а во вторых —

золота и серебра, в целом различие между ними не больше, чем разнообразие самих американских месторождений.

Важнейшая роль метода ВП обусловлена тем, что вкрапленные меднопорфировые руды ни по плотности, ни по магнитной восприимчивости, ни по электропроводности не выделяются в достаточной мере от вмещающих пород. Магнито-, грави- и электроразведка методом сопротивления служат только для решений задач геологического картирования.

В. Пелтон и П. Смит [392] подробно изложили условия и результаты применения метода ВП на Филиппинских островах. Правильное определение типа искомых месторождений, обнаружение рудоконтролирующих разломов и картирование зон измененных пород служат исходным условием выявления промышленных месторождений. Метод ВП дает прямые указания на сульфидную минерализацию, причем между аномалиями ВП и контуром медных руд подчас наблюдается исключительная корреляция. На одном из участков бурением в контуре аномалии ВП в течение 1 года доказаны запасы меди 98,4 млн. т (среднее содержание меди в руде 0,5%).

Ориентировочный размер зоны сульфидной минерализации крупного меднопорфирового месторождения составляет 1 км<sup>3</sup> (4 × 0,5 × 0,5 км<sup>3</sup>). Для поисков таких месторождений достаточно применять редкую сеть наблюдений. Например, фирма «Кеннекот Эксплорэйшн» в штатах Аризона и Нью-Мексико в США применяет дипольную установку с размером токового 600 и векторного измерительного диполя 150 м. Измерения проводят в восьми направлениях от центра токового диполя на окружности радиусом 1500—2000 м. Шаг перемещений токового диполя составляет 3200 м. Используют фазовые измерения на частоте переменного тока от 0,125 до 1 Гц. При использовании автомобилей площадь съемки за день составляет 11 км<sup>2</sup>, стоимость — 42 дол. на 1 км<sup>2</sup>. При использовании вертолета скорость съемки увеличивается до 21 км<sup>2</sup> в день, стоимость до 45 дол. на 1 км<sup>2</sup>. Выявленные зоны детально изучают с помощью дипольного профилирования на четырех разносах от 100 до 600 м.

Привлекают внимание геофизические работы на уникальном месторождении самородной меди в районе Верхнего озера в США [3, 331, 401]. Медное оруденение приурочено к лежащему боку залежи миндалекаменных пород, представленной лавовыми потоками и конгломератами и расположенной между разновозрастными базальтами. Содержание самородной меди в руде в среднем составляет 1, иногда доходит до 10%. Кроме того, в рудных телах присутствуют магнетит и ильменит. Пространственное распределение руд весьма сложное, и эффективность бурения при детальной разведке тел была низкой. Коэффициент «обнаружения», которым А. Шиллингер назвал отношение количества скважин, встретивших рудные тела, к общему количеству скважин, составлял 34%.

В 1954 г. руководитель геологических работ на руднике Оссеола решил опробовать метод ВП. Предварительно сотрудники Мичиганского университета исследовали поляризуемость руд и установили, что она возрастает пропорционально содержанию меди, магнетита и ильменита [331]. Затем были проведены исследования в 316 скважинах подземного бурения с трехэлектродным зондом, в котором  $AO = 1,5$  м,  $MN = 1,2$  м. По результатам измерений вычисляли значения кажущегося удельного сопротивления и кажущейся поляризуемости. Первые использовали для определения контактов миндалекаменных пород с плохо проводящими базальтами, вторые — для выявления зон рудной минерализации и их полуколичественной оценки. А. Шиллингер [401] ввел следующую градацию аномалий:

| Аномалия             | $\eta_k$ , % |
|----------------------|--------------|
| «слабая»             | 3—5          |
| «удовлетворительная» | 5—10         |
| «хорошая»            | 10—20        |
| «очень хорошая»      | >20          |

Кроме того, при оценке аномалий учитывалось соотношение графиков  $\eta_k$  и  $\rho_k$ . Наиболее перспективными считались аномалии, в пределах которых максимуму  $\eta_k$  соответствовало понижение  $\rho_k$ .

Три примера даны на рис. 147. Первый I из них демонстрирует хорошее согласование геологических и геофизических данных на известной рудной зоне. Судя по керну скважины, рудная зона расположена в интервале 6—9 м. Она отмечается резким понижением  $\rho_k$  и повышением  $\eta_k$  почти до 100%. Второй пример II демонстрирует обнаружение новой зоны по данным метода ВП, в то время как геологами она сначала была пропущена. Аномалия ВП в интервале 5—10 м была подтверждена горными выработками, вскрывшими здесь промышленные руды. На третьем примере III показано поведение  $\eta_k$  и  $\rho_k$  в скважине, где рудная минерализация отсутствует и по геологическим, и по геофизическим данным.

Исследования А. Шиллингера показали, что на основе анализа керна и шлама (соответственно колонковому алмазному и ударному бескерновому бурению) выявлена лишь половина рудных тел, впоследствии вскрытых эксплуатационными горными выработками. По данным метода ВП геофизиками (без учета анализа керна геологами) рудная минерализация устанавливалась в 65% случаев. При совместном использовании геологических и геофизических данных коэффициент «обнаружения» рудных тел достиг 72% т. е. примерно в 1,5 раза превысил исходное значение. За счет исследований скважин методом ВП удалось сократить число колодезных скважин в пользу бескерновых. Из 46 случаев рекомендаций, сделанных геофизиками, в 36 случаях горными выработками были вскрыты медные руды. В остальных 10 случаях интерпретация была ошибочной, потому что интерпретатор или не-

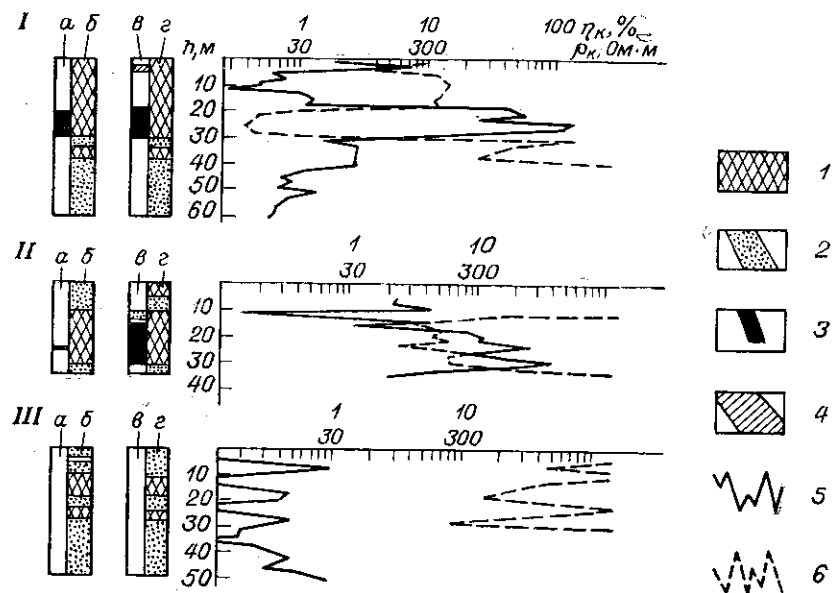


Рис. 147. Сопоставление скважинных измерений  $\eta_k$  и  $\rho_k$  с данными бурения на месторождении самородной меди (по А. Шиллингеру [401]).

а — зона рудной минерализации, обнаруженная по керну; б — литологическая колонка по данным анализа керна; а — разрез по данным измерений  $\eta_k$ ; б — литологический разрез по данным измерений  $\rho_k$ .  
1 — миндалекаменная порода; 2 — базальт; 3 — рудная зона; 4 — зона бедной минерализации; график: б —  $\eta_k$ , а —  $\rho_k$ .

дооценил значение аномалии, или отнес к числу перспективных аномалии, вызванные магнетитовой минерализацией. Однако ни в одном случае, как подчеркивает А. Шиллингер, не было обнаружено ложной, т. е. не обусловленной электропроводящими минералами, аномалии вызванной поляризации.

На полиметаллических месторождениях Рудного Алтая 1952—1959 гг. проведены основные опытные работы по созданию

сначала наземных, затем скважинных вариантов метода ВП [122, 123, 139, 204, 242, 258, 259]. Здесь же возникла комплексная методика поисков глубоко залегающих месторождений в закрытых районах, базирующаяся на сочетании бурения со скважинными геофизическими и геохимическими методами [43, 44, 247]. Эта методика, в создании которой весьма деятельную роль сыграли сотрудники ВИТР и местных геологических управлений, в последние годы была успешно опробована в Киргизии, Узбекистане, Центральном Казахстане, Воронежской области и других районах [149, 214, 236, 247, 310, 323].

На этапе поисков месторождений наиболее эффективны съемки в масштабах 1 : 100 000, 1 : 50 000 и 1 : 25 000. Первые дают возмож-

ность выявить рудные поля, вторые — их оконтурить, третьи — выделить отдельные аномальные зоны, отмечающие месторождениям.

По подсчетам М. В. Семенова [214], на Алтае к 1967 г. съемкой в масштабе 1 : 25 000 покрыто примерно 1000 км<sup>2</sup>. Выявлено 160 аномалий ВП. При этом все известные месторождения отметились четкими аномалиями кажущейся поляризуемости. Открыто Степное месторождение. Кроме того, при проверке четырех аномалий ВП установлена промышленная концентрация полиметаллов.

В полиметаллическом поясе Рудного Алтая известно свыше 1000 рудопроявлений, но только около двух десятков промышленных месторождений [102]. Соответственно и число аномалий ВП, дающих шансы на обнаружение новых месторождений, должно быть не более двух из ста.

Представление о характере графиков  $\eta_k$ , получаемых при съемке на большой территории, дает рис. 148, на котором приведены результаты производственных работ на одном из рудных полей Алтая [21]. Наблюдения выполнены по схеме срединного градиента с разносами  $AB = 1600$  м,  $MN = 80$  м и в 1120-метровом интервале между токовыми электродами по сети  $250 \times 80$  м;  $t_3 = 2$  мин,  $t = 0,5$  с. Полиметаллическое месторождение, находящееся на обследованной территории, залегает среди вулканогенно-осадочных пород среднего девона, которые слагают ядро брахисинклинальной складки. В крыльях складки расположены нижнепалеозойские метаморфизованные песчаники и глинистые сланцы. Оруденение имеет гнездово-вкрапленный, прожилковый и иногда сливной характер; в его составе галенит, сфалерит, халькопирит и пирит. Рудные тела имеют жиллообразную форму и наклонное залегание. Мощность рыхлых отложений колеблется от 0 до 50 м.

Как видно на рис. 148, на большей части профилей значения  $\eta_k \approx 1\%$ . На выходах коренных пород  $\eta_k$  иногда повышается до 1,5—2, иногда остается в пределах 1—1,5%. На этом фоне ясно проявляется крупная аномалия на Пр. 50—61, ПК 10 — ПК 16, которая соответствует известному месторождению. Разведанные контуры месторождения характеризуются показанными на рис. 148 проекциями рудных зон на поверхность коренных пород по каждому из геологических разрезов. Мощность рыхлых отложений на месторождении постепенно уменьшается от 30 м до 0 с запада на восток. Соответственно и кажущаяся поляризуемость составляет от 5 до 8%.

На Пр. 33—35 (ПК 20) и Пр. 44—47 (ПК 20—ПК 28) имеются два рудопроявления, на которых пробурено около 30 скважин, установивших мелкие изолированные тела с убогим содержанием полиметаллов. На этих рудопроявлениях получены литохимические аномалии, но аномалии ВП оказались слабыми или вовсе отсутствовали.

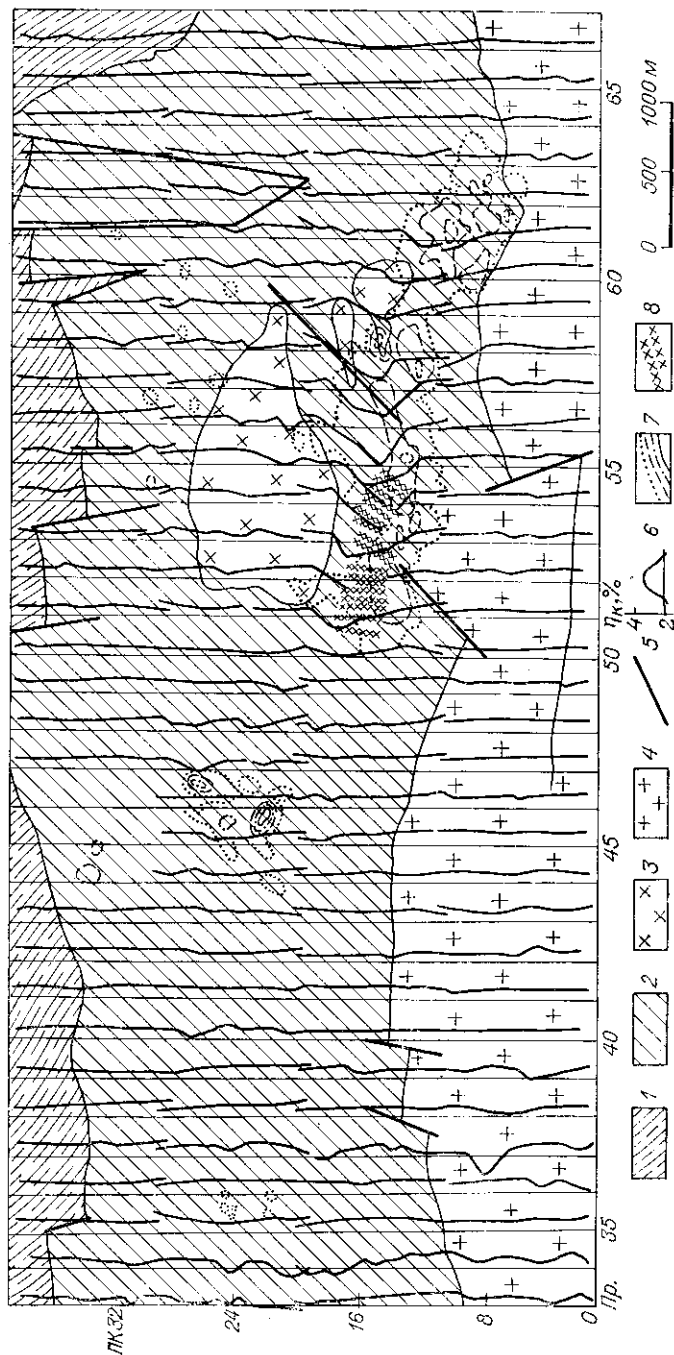


Рис. 148. План графиков  $\eta_k$  на одном из участков Рудного Алтая (по В. А. Белашу [21]).

1 — нижнепалеозойские метаморфизованные песчаники и глинистые сланцы; 2 — среднедевонская толща переслаивающихся аргиллитов, туфов, эффузивов, кремнистых сланцев и конгломератов; 3 — субвулканические образования; 4 — граниты и адамеллиты; 5 — тектонические нарушения; 6 — графики  $\eta_k$  свинца; 7 — контуры металлометрических аномалий (концентрация свинца от 0,003 до 0,3%); 8 — проекция рудного поля.

Аналогичные результаты получены на Карболихинском рудном поле [27]. Все довольно многочисленные месторождения и рудопроявления отмечены повышенными значениями кажущейся поляризуемости. Из выявленных аномалий ВП примерно одна четвертая часть соответствует разведанным участкам, из которых только половина несет промышленные концентрации полиметаллов. Выбрать среди аномалий ВП наиболее надежные трудно. Не дают нужные для этого сведения методы естественного электрического поля и комбинированного профилирования, широко применявшиеся на рассматриваемой территории. Из 30 аномалий естественного поля, установленных в пределах Карболихинского рудного поля, большинство не совпадает с рудными зонами, а из семи разведанных месторождений аномалией отмечается лишь одно. Наблюдается приуроченность аномалий к повышениям рельефа местности. Еще ниже эффективность метода сопротивлений [242].

В Прииртышской зоне смятия на Рудном Алтае, а также в ряде районов Центрального и Южного Казахстана, Восточного Забайкалья и Салаира полиметаллические рудные тела нередко приурочены к графитизированным сланцам и углистым известнякам. Такое соседство, с одной стороны, препятствует прямому выявлению рудных тел, с другой — облегчает мелкомасштабные поисковые работы, поскольку рудоносные зоны, сочетающиеся с графитизированными породами, отмечаются широкими и интенсивными аномалиями ВП [32, 250].

На южном склоне Большого Кавказа полиметаллическое рудное поле приурочено к юрским глинистым сланцам. Сопутствующая ему пиритизация пород порождает широкие аномалии кажущейся поляризуемости (до 10—20%), на «фоне» которых рудные зоны отмечаются значениями  $\eta_k$ , достигающими 30—35% [202]. В состав руды помимо меди, свинца и цинка входят кобальт, висмут, олово, серебро и золото. Сочетание литогеохимической съемки с геофизическими исследованиями, включающими метод ВП, позволило местным геофизикам добиться эффективного проведения поисковых работ.

В Приднестровье на территории Подольской тектонической зоны полиметаллические и медные рудопроявления размещены в трепелах и песчаниках позднепротерозойского возраста, залегающих на архейском гранитном фундаменте и, в свою очередь, перекрытых мезо-кайнозойскими песчано-карбонатными породами. В ходе опытных работ сотрудники АН УССР А. Ф. Сергатов и В. С. Сизоненко [267] установили, что рудовмещающие породы характеризуются «нормальными» значениями поляризуемости ( $\eta_k \approx 1 \div 2\%$ ), а над рудными зонами кажущаяся поляризуемость превышает 3 и иногда достигает 11%. Заданная ими для проверки одной из аномалий ВП скважина на глубине 65 м встретила свинцово-цинковую сульфидную минерализацию. Авторы рекомендовали метод ВП для производственного применения с целью вы-

явления оруденения в пределах разломно-трещинных зон, картируемых с помощью гравитационной и магнитной съемок. Так как глубина рудных тел достигает 100—150 м, то разнос АВ должен быть не менее 1,5—2 км. Кроме того, рекомендованы скважинные варианты метода ВП, особенно необходимые для проведения поисковых работ на участках, где мезо-кайнозойские карбонатные породы имеют высокое сопротивление и играют роль экрана тока при размещении токовых электродов на поверхности земли.

Несмотря на трудности выявления рудных тел, благодаря комплексному применению геологических, геохимических и геофизических методов, включая метод ВП, во многих районах в последние годы открыты новые месторождения или расширены запасы ранее известных месторождений. Например, на Рудном Алтае с помощью скважинных методов установлено продолжение и истинное склонение основного рудного тела Иртышского месторождения, и за счет этого запасы месторождения увеличены более чем в 2 раза. На Орловском месторождении определено положение рудного тела, не встреченного ранее тремя пройденными рядом с ним скважинами [43].

Хорошие результаты получены не только на месторождениях, приуроченных к туфо-эффузивным породам как на Алтае, но и на месторождениях, залегающих среди карбонатных пород. К числу последних относятся многочисленные метасоматические скварные месторождения в Таджикистане, Узбекистане, Приморье, на Кавказе и бесскарновые месторождения Восточного и Западного Забайкалья. Анализ работ в перечисленных районах дан в статьях А. Н. Балашева и др. [20], Б. И. Болкового и Ю. И. Кривопапова [31], И. И. Попова [224—226], Б. П. Самарина [246], Р. С. Сейфуллина и Ю. С. Гребенщикова [250].

Свинцово-цинковые месторождения в Каратау (Южный Казахстан) известны как один из труднейших объектов для геофизических методов. Приуроченные к слоистым известнякам и доломитам пластовые тела вкрапленных руд так называемого миргалымсайского типа не выделяются по электропроводности и магнитной восприимчивости. Основную роль при поисках здесь играет литохимическая съемка [68, 193, 317]. С ее помощью в сочетании с проверочным бурением мелких скважин (20—30 м) сначала выявили ореолы рассеяния свинца в зонах дробления и закарстования известняков и доломитов. Затем провели площадную съемку методом ВП по сети 100 × 20 м и обнаружили две аномальные зоны. Одна из них протяженностью более 2 км не совпала с металлотрическими аномалиями и оказалась связанной с безрудными углито-графитистыми известняками и доломитами. Вторая зона, состоящая из нескольких локальных аномалий ВП со значениями  $\eta_k = 5 \div 7$  при фоне 1—1,5%, коррелировалась с ореолами рассеяния свинца и цинка и была выбрана для дальнейшего изучения.

На самой интенсивной аномалии, показанной на рис. 149, а, выполнили вертикальное зондирование (ВЭЗ № 1) и определили,

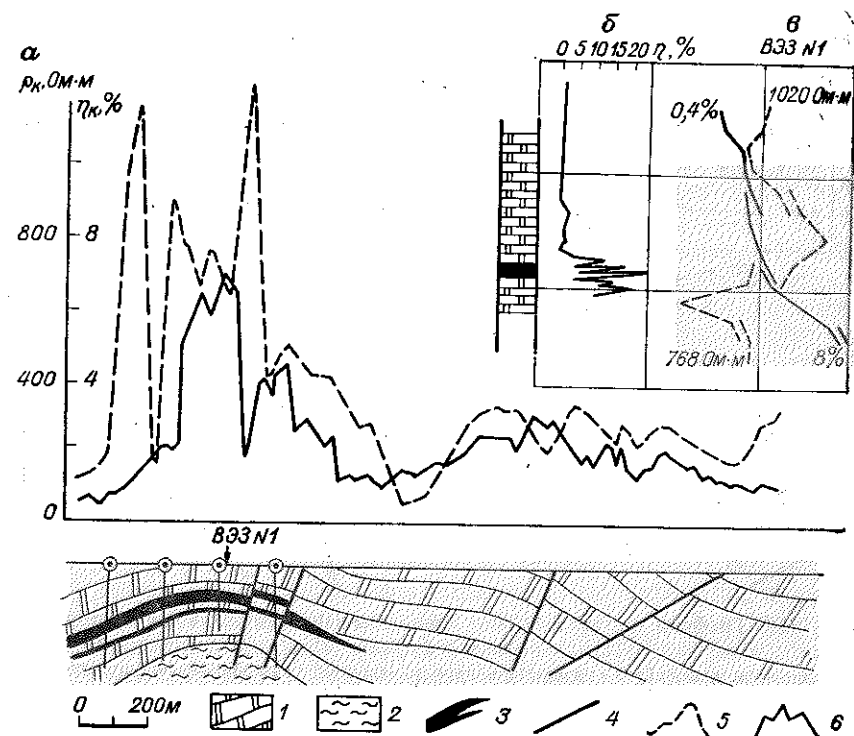


Рис. 149. Графики  $\eta_k$  и  $\rho_k$  среднего градиента (а), поляризуемости образцов керна (б) и вертикального зондирования (в) над свинцово-цинковым месторождением в Южном Казахстане [317].

1 — известняки, доломиты; 2 — аргиллиты, алевролиты; 3 — рудные тела; 4 — тектоническое нарушение; графики: 5 —  $\rho_k$ , 6 —  $\eta_k$ .

что поляризующийся объект залегает на глубине 60—80 м. С учетом аномалии ВП задали скважину, которая встретила 15-метровый пласт окремнелых графитизированных доломитов с промышленным содержанием сфалерита и галенита (пирит и халькопирит играют подчиненную роль). Изучение керна показало, что поляризуемость рудоносного пласта достигает 25% (рис. 150, б). Дальнейшее бурение привело к открытию промышленного полиметаллического месторождения, разрез которого показан на рис. 150 [317].

Успех метода ВП в рассмотренном случае обусловлен связью промышленных концентраций сфалерита и галенита с интенсивно графитизированными породами. Надо сказать, что свинцово-цинковые месторождения, приуроченные к карбонатным породам, иногда почти не содержат пирита, а объемная концентрация галенита составляет в среднем лишь 1—2%. Такого типа руды не обладают высокой поляризуемостью. И дело здесь не в какой-то «угнетающей» роли карбонатных пород, о которой писали некото-

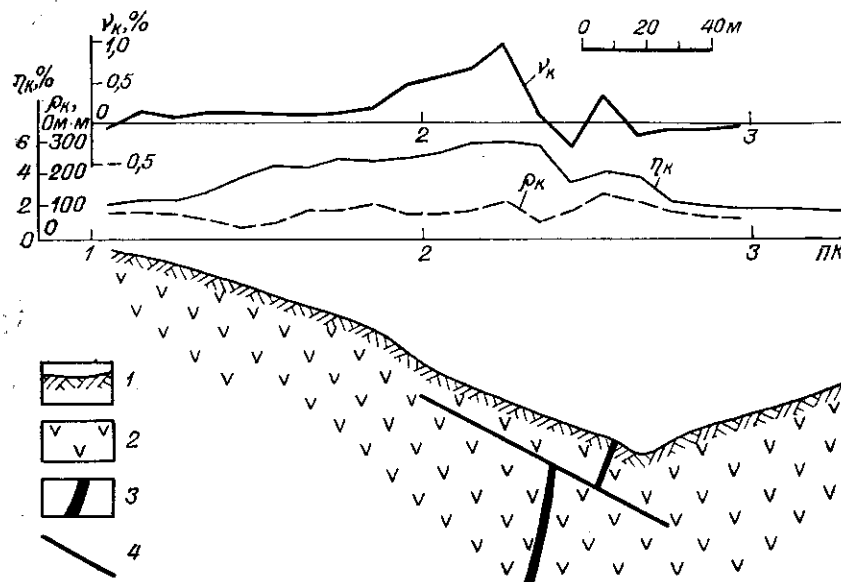


Рис. 150. Графики  $\eta_k$ ,  $\rho_k$  и  $\gamma_k$  над полиметаллическим жильным месторождением в Грузии.

1 — почва и делювий; 2 — гидротермально измененные туфо-эффузивные породы; 3 — сульфидные руды; 4 — тектоническое нарушение.

рые геофизики [222], а в низкой концентрации электропроводящих минералов. Точно так же и окисление рудных минералов, приводящее к затуханию аномалий ВП, не является исключительным свойством карбонатных вмещающих пород и встречается на месторождениях, залегающих среди силикатных пород.

Природные условия благоприятствуют успеху метода ВП. На подавляющем большинстве полиметаллических месторождений рудные зоны имеют высокую поляризуемость за счет пирита, графита и других электронных проводников. Четкие аномалии  $\eta_k$  получены над залегающими среди карбонатных пород полиметаллическими месторождениями в Узбекистане [225, 226], в Бурятии, а также в Иране [335, 362], Канаде [408], Ирландии [406], Италии [348, 394].

Гидротермальные жильные месторождения, распространенные на Северном Кавказе, в Киргизии, Закавказье и других районах, как показал опыт работ методом ВП, отмечаются довольно интенсивными и широкими аномалиями ВП, охватывающими рудные зоны в целом, в то время как проследить отдельные жилы с помощью установки срединного градиента обычно нельзя [57, 67, 68]. В качестве примера рассмотрим результаты опытных работ на месторождении в Грузии. Здесь рудовмещающими являются альбитофиры и их туфы, подвергшиеся интенсивным гидротермаль-

ным изменениям в зоне дробления. Крутопадающие жилы, содержащие пирит, галенит, сфалерит, халькопирит и кварц, имеют мощность от нескольких сантиметров до 1 м и располагаются среди каолинизированных, обохренных, окварцованных и пиритизированных пород. По данным площадной съемки за пределами месторождения  $\eta_k$  составляет около 2%, вблизи него повышается до 3%. Рудоносная зона отмечается аномальными значениями  $\eta_k = 8\%$ .

Для выявления сульфидных жил проведена векторная съемка, пример которой дан на рис. 150. Знак векторного параметра  $\gamma_k$  меняется над двумя частями главной жилы. Подобное характерное поведение  $\gamma_k$  получено также на месторождениях Рудного Алтая [122, 242], Таджикистана [20], Узбекистана и других районов (рис. 103 и 105).

С помощью комбинированного профилирования методом ВП удается не только определить контур рудной зоны, но и по «обратным» пересечениям графиков  $\eta_k$  проследить оси аномалий ВП, которые часто коррелируются с жильными телами. Хорошие примеры таких работ на полиметаллических месторождениях Северного Кавказа даны в статье А. Е. Гезина [57]. В связи с тем что рудные тела имеют крутое падение и, как правило, высокую электрическую проводимость, при оптимальном выборе разносов интенсивность аномалий  $\eta_k$  комбинированного профилирования выше, чем с установкой срединного градиента. К тому же пересечение графиков  $\eta_k$ , остающееся четким даже при небольшой амплитуде аномалий  $\eta_k$ , дает возможность проследить поляризующийся объект и тогда, когда по данным срединного градиента это сделать невозможно.

На стадии разведки всех типов полиметаллических месторождений определенную пользу приносят скважинные варианты метода ВП. Сообщения об успехах на месторождениях Центрального Казахстана, Рудного Алтая, Западного Узбекистана, Северной Киргизии и других районов можно найти в опубликованных работах [68, 69, 224, 226, 258, 260, 298, 310, 323].

По инициативе С. В. Бадаляна на рудниках Армении применяют подземные варианты метода ВП [12, 13, 14, 15]. Например, на Ахтальском полиметаллическом месторождении при изучении подземных выработок обнаружена новая зона прожилково-вкрапленных руд, что послужило основанием для дальнейшего развития геологоразведочных работ на одном из старейших рудников страны. Геофизики Армении сконструировали снаряд для исследований скважин электроразведочными методами и предложили частично заменить проходку разведочных штреков и квершлагов бурением скважин и их геофизическим изучением [6].

Повышение разрешающей способности метода ВП при поисках полиметаллических месторождений, как и медных, в последние годы достигается за счет детального анализа временных характеристик ВП и изучения нелинейной составляющей ВП. Примеры

временных характеристик приведены на рис. 127 и 144. Они различаются у пиритизированных и графитизированных пород, высокая поляризуемость которых обусловлена мелкими рассеянными включениями электронных проводников, и у рудных тел, образованных относительно крупными включениями и прожилками электропроводящих минералов.

Вместе с тем временные характеристики, в принципе, при сходной текстуре объектов могут быть одинаковыми для сульфидных и графитовых тел. Эти тела надежнее всего разделяются с помощью исследований НВП. На рис. 151 показаны сводные результаты работ. Над месторождением получена четкая аномалия  $\eta_k$  срединного градиента ( $AB = 1200$ ;  $MN = 20$  м;  $t_s = 2$  мин,  $t = 0,5$  с), с ней хорошо коррелируется аномалия фазового угла  $\varphi_{ВП}$ , измеренного на частоте 2,44 Гц.

Изучение потенциала НВП показало, что над месторождением он имеет отрицательный знак, характерный для полиметаллических руд. Служащее интерпретационным параметром в методе НВП отношение потенциала НВП к напряженности поля линейной ВП  $\gamma = -0,54$  м.

Отрицательный знак имеет и потенциал НВП, измеренный на токе частоты 2,44 Гц по изменению мнимой компоненты напряжения после дополнительного включения в токовую линию постоянного тока. Отрицательный знак означает, что включение постоянного тока приводит к уменьшению мнимой компоненты потенциала. График  $U_{НВП}$  по профилю над месторождением приведен на рис. 152, его форма сходна с графиком напряженности аномального поля ВП. В отличие от полиметаллического месторождения над графитовыми телами наблюдается положительный знак  $U_{НВП}$ .

Обращаясь к работам за рубежом, надо отметить, что в странах социалистического лагеря применяют в основном ту же методику и аппаратуру, что в СССР. С помощью метода ВП в Болгарии и Чехословакии найдены полиметаллические залежи [90, 353, 363—365, 425, 426]. В Румынии и Польше, где отчасти используют канадскую аппаратуру, метод ВП признан удобным для оценки аномалий, получаемых другими методами [400, 418]. Видный югославский специалист Ф. Шуми уже 20 лет назад провел успешные работы методом ВП на полиметаллических и ртутном месторождениях в Югославии [411, 412] и правильно оценил перспективы метода.

Известные канадские фирмы «Синтрекс» и «Мак-Фар» с помощью метода ВП обнаружили пять свинцово-серебряных месторождений в Ирландии [366, 393, 405, 406]. Заслуживает внимания история открытия рудных тел месторождения Пирамид в районе Пайн Пойнт на северо-западе Канады. Фирма «Синтрекс» начала работы здесь в августе 1965 г., а через год в ноябре 1966 г. ее руководитель Г. Сигел на съезде Американского общества геофизиков-разведчиков сделал доклад о результатах проверки аномалий ВП с помощью буровых скважин. В итоге открыто место-

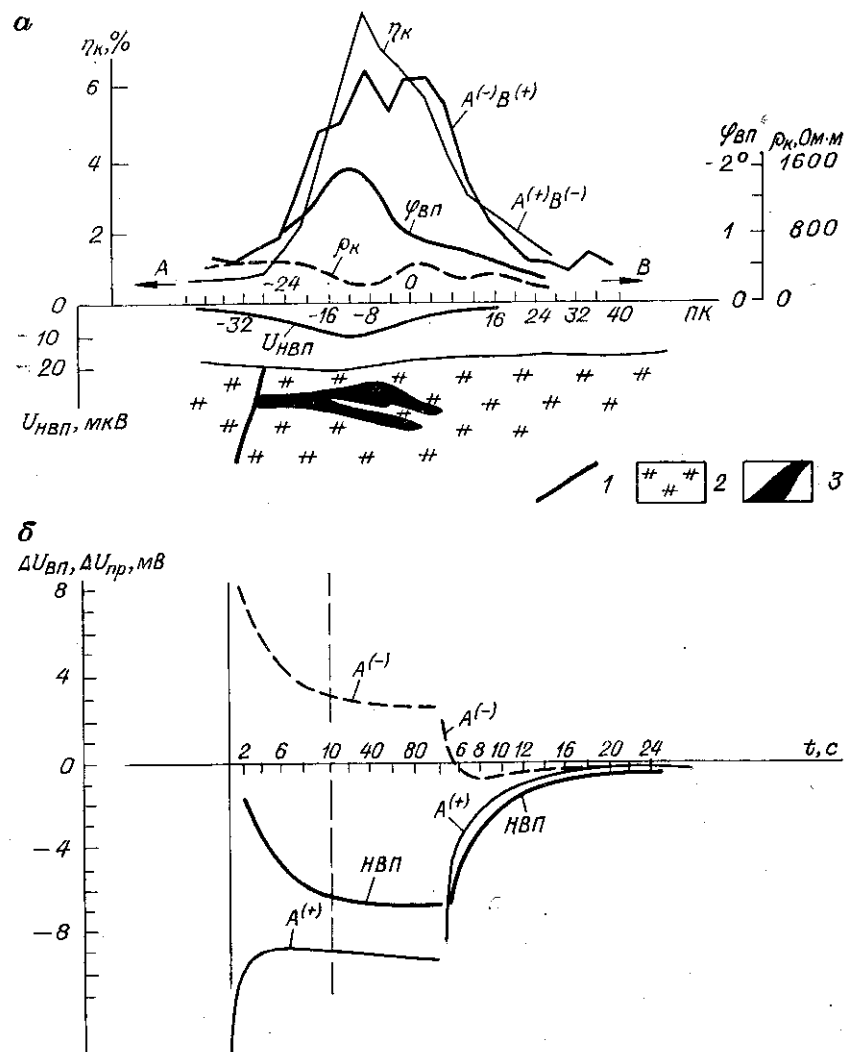


Рис. 151. Результаты работ на колчеданно-полиметаллическом месторождении на Рудном Алтае.

а — графики параметров сопротивления  $\rho_k$ , вызванной поляризации  $\eta_k$ ,  $\varphi_{ВП}$  и нелинейных процессов  $U_{НВП}$  по профилю; б — временные зависимости потенциалов ВП ( $A^+$  и  $A^-$ ) и нелинейной вызванной поляризации (НВП) на ПК — 8 над рудным телом. 1 — тектоническое нарушение; 2 — эффузивные породы; 3 — рудные тела.

рождение с запасами  $11,2 \cdot 10^6$  т руды, содержащей в среднем 11,7% свинца и цинка [408]. Пологозалегающие рудные тела расположены среди среднедевонских известняков и доломитов, ниже которых на глубине 300 м находятся породы докембрийского складчатого фундамента.

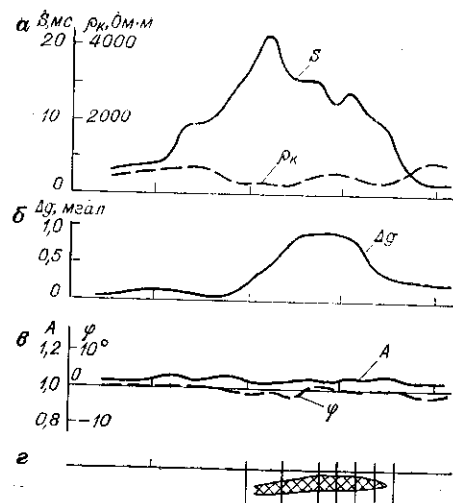


Рис. 152. Результаты работ по одному из профилей на месторождении Пайн Пойнт в Канаде (по Г. Сигелу и др. [408]).

Графики: а —  $S$  и  $\rho_k$  среднего градиента, б —  $\Delta g$  гравиметровой съемки, в — отношения амплитуд  $A$  и сдвига фазы  $\varphi$  переменного тока, измеренных методом ТУРАМ на частоте 400 Гц; г — схематический геологический разрез.

Работы провели с аппаратурой «Марк-5» в режиме разнополярных импульсов тока ( $t_3 = 2$  с; пауза 2 с). Применяли трехэлектродную установку профилирования с равными расстояниями между электродами, которые при рекогносцировочных работах составляли 90 м,

а при детализации обнаруженных аномалий уменьшались до 7,5 м. После завершения работ методом ВП на основной, наиболее интенсивной аномалии ВП пробурили две скважины, вскрывшие свинцово-цинковую руду. После этого аномалии ВП подвергли изучению с помощью высокоточной гравиметровой съемки. Расстояние между точками наблюдения составляло 30 м. По данным гравиметрии уточнили контуры рудных тел, в общем совпавшие с результатами интерпретации аномалий ВП, и подсчитали запасы руды, в дальнейшем подтвердившиеся с вполне удовлетворительной точностью.

Разбуривание рудных тел проведено весьма энергично. На первой аномалии ВП, имеющей длину 780 м и ширину 480 м, пробурили 185 скважин общей длиной свыше 10,8 км. В разведанном теле, получившем номер 1, подсчитано  $9,2 \cdot 10^6$  т руды со средним содержанием свинца и цинка около 12%. Схематический геологический разрез и результаты геофизических наблюдений по одному из профилей над этим телом приведены на рис. 152. Помимо данных метода ВП и гравиметрии показаны графики амплитуды и фазы электромагнитного поля, измеренного по методу ТУРАМ на частоте 400 Гц. Несмотря на довольно высокую концентрацию в рудном теле галенита, марказита и сфалерита, электрическая проводимость тела в силу вкрапленного характера руды оказалась невысокой и электромагнитная аномалия слабой.

Сульфидные медно-никелевые месторождения, приуроченные к интрузиям норитов, габбро-норитов и перидотитов, распространены на Кольском полуострове и в районе Норильска. Того же типа месторождения обнаружены в Воронежской области, в Северном Прибайкалье и Восточном

Казахстане. Во всех районах рудные тела, состоящие из пирротина, халькопирита и пентландита, отмечаются аномалиями ВП, однако условия применения и значение метода ВП различны.

В Печенгском районе Кольского полуострова никелевое оружение тяготеет к «лежачему» боку ультраосновных интрузивных тел, внедрившихся в толщу эффузивно-осадочных пород. В экзо-контактах этих тел вмещающие филлиты повсеместно несут вкрапленность пирротина (реже пирита), вследствие этого не только крутопадающие рудоносные интрузии, но и окружающие их филлиты отмечаются высокими значениями кажущейся поляризуемости (от 15 до 70%) [216]. Прямое выявление рудных тел оказывается затруднительным, однако никеленосность интрузий в определенной степени пропорциональна интенсивности сульфидизации пород, в силу чего богатым никелем сульфидным зонам соответствуют наибольшие аномалии ВП.

В Мончегорском районе сотрудники ВИТР [216] провели опытные работы над пологозалегающим пластом вкрапленных руд и над крутопадающими жилами, состоящими из сплошных сульфидов. Условия работ над первыми аналогичны тем, что встречаются на медных и полиметаллических месторождениях, и характер аномалий ВП над ними тот же самый. Исследования, выполненные над пирротиновыми жилами, имеют принципиальное значение для оценки возможностей метода ВП при выявлении сплошных сульфидных руд, лишенных ореолов вкрапленности.

Жилы Мончегорского месторождения имеют мощность от единиц до первых десятков сантиметров, залегают почти вертикально и обладают большой протяженностью в длину и в глубину. Измерения по методу ВП провели с установкой комбинированного профилирования сначала с разносами  $AO = OB = 22,5$  м,  $MN = 5$  м, затем, из-за высоких помех на ряде точек, с разносами  $AO = OB = 15$  м,  $MN = 5$  м. Полученные Н. А. Пишпарева графики  $\eta_k$  показаны на рис. 153. Рудное поле в целом отмечается повышенными значениями  $\eta_k$ , которые над главными жилами достигают 10—14%. Над многими жилами наблюдаются четкие «обратные» пересечения графиков  $\eta_k$ . Некоторые близко расположенные жилы, в силу небольшого расстояния между ними по сравнению с разномом электродов, отметились общей аномалией ВП. На безрудном участке значения кажущейся поляризуемости не превышали 2% [216]. Эти работы показали практическую возможность обнаружения с помощью метода ВП рудных тел, состоящих из сплошных сульфидов, хотя при каротажных исследованиях были получены менее определенные результаты [228, 232].

В Ловноозерском районе никеленосными являются линзообразные и пластообразные тела относительно молодых норитов и габбро-норитов, залегающих среди подвергшихся метаморфизации диоритов. В меньшей степени развиты лейкократовые разновидности габбро-диоритовой серии: гранато-кварцевые и кварцево-полевошпатовые породы и основные дериваты ее — габбро-нориты. Ру-

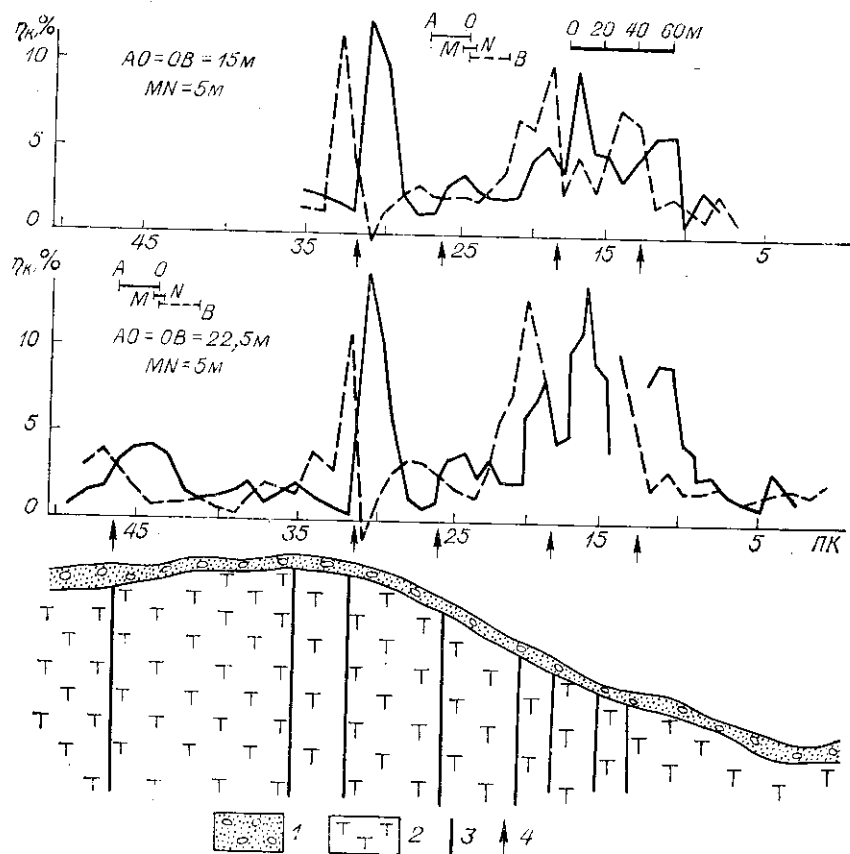


Рис. 153. Графики  $\eta_k$  комбинированного профилирования над сульфидными жилами Мончегорского месторождения [216].  
1 — ледниковая морена; 2 — пироксениты; 3 — рудные жилы; 4 — «обратные» пересечения графиков  $\eta_k$ .

доносные нориты и габбро-нориты содержат преимущественно вкрапленные руды, представленные пирротинитом, пентландитом, халькопиритом и пиритом. Иногда встречаются вкрапленно-прожилковые руды, тогда рудные тела обладают высокой электрической проводимостью (пример результатов метода ВП над таким телом дан на рис. 121, а). Но чаще всего электрическая проводимость тел рудных норитов и габбро-норитов невелика и методом сопротивлений они не выявляются. В этих условиях метод ВП становится особенно полезным, и он хорошо зарекомендовал себя на производственных работах [314]. Несомненный методический интерес представляют зимние работы, выполненные в 1965 г. на льду озера полевой партией, руководимой А. Н. Ивановым. Измерения проведены в режиме разнополярных импульсов тока с зарядкой 10 с, паузой 5 с. Измерительными электродами служили

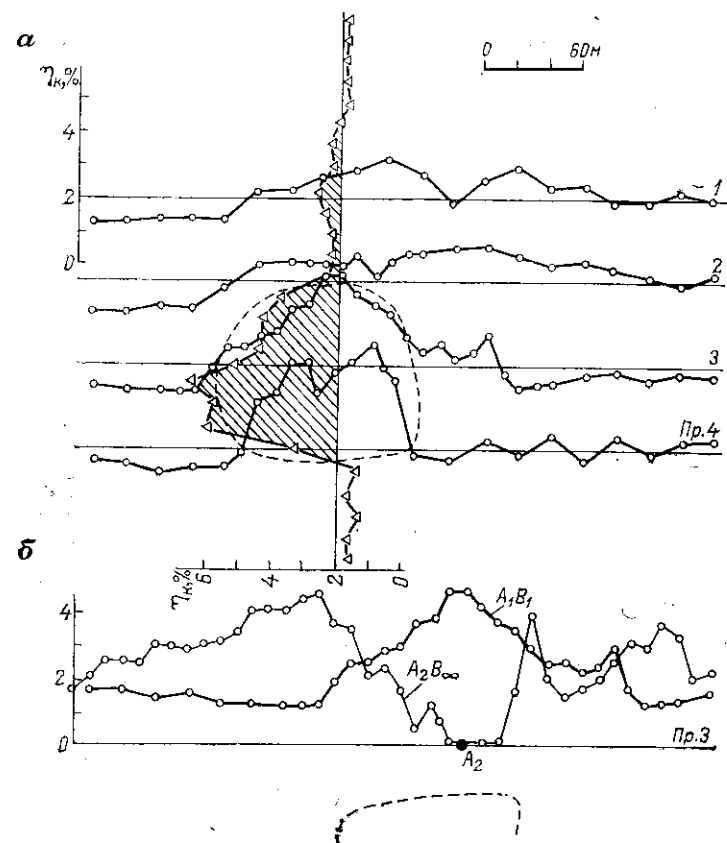


Рис. 154. План графиков  $\eta_k$  (а) и графики  $\eta_k$  по Пр. 3 (б), полученные при зимних работах на льду озера на Кольском полуострове (по А. Н. Иванову).  $AB = 500$  м;  $MN = 10$  м. Штриховой линией показаны контуры основного возмущающего объекта.

куски медной проволоки, которые опускали в воду через специально сделанные лунки во льду\*. При разnose  $AB$  свыше 1 км аномалия  $\eta_k$  была обнаружена в средней части  $AB$ . Для ее детализации, во-первых, был пройден дополнительный профиль с токовой линией, ориентированной по простиранию выявленной аномалии, во-вторых, проведены измерения с токовым электродом, помещенным в центр этой аномалии (рис. 154). В итоге был установлен контур возмущающего объекта и определена его глубина, оказавшаяся равной примерно 30 м, что соответствует толщине

\* Зимой сосуды неполяризующихся электродов обледеневают и к работе оказываются непригодными. Поэтому приходится пользоваться «открытыми» электродами, которые летом совершенно недопустимы, но зимой, судя по опыту работ на Кольском полуострове и в Канаде, ведут себя довольно сносно.

слоя воды в озере. Вблизи токового электрода  $A_2$  кажущаяся поляризуемость равнялась нулю, поскольку в этих условиях в исследуемой зоне находилась лишь вода, не обладающая поляризуемостью. В центре аномалии ВП была пробурена скважина, которая прошла по пентландито-пирротиновой руде около 30 м.

В четвертом районе Кольского полуострова залежи сульфидных медно-никелевых руд приурочены к небольшим по размерам телам метаперидотитов, расположенным в толще гнейсов. Г. Н. Михайлов [196] провел работы над тремя известными рудными телами, над безрудным ультраосновным телом и над зонами тектонических нарушений. Над всеми рудными телами установлены четкие аномалии ВП: кажущаяся поляризуемость над ними достигала 8; 15 и 32% при фоновой поляризуемости от 1 до 2,5%. Над ультраосновными породами, содержащими некоторое количество магнетита и других электропроводящих минералов, значения  $\eta_k$  составляли 4—5%. Над безрудными тектоническими зонами, отмечаемыми глубокими минимумами  $\rho_k$  и аномалиями метода ТУРАМ, значения  $\eta_k$  не превышали 2%. Для проверки одной из таких аномалий были пробурены две скважины, вскрывшие безрудные породы. Зато на другом участке, как отмечает Г. Н. Михайлов [196], аномалия по методу ТУРАМ была незначительной, а аномалия ВП четкой. Здесь бурением на аномалии ВП на глубине 16 м обнаружен пласт густоокрапленных сульфидов.

В Норильском районе медно-никелевое оруденение связано с корытообразными интрузиями дифференцированных габбро-диабазов, имеющих пологое падение, согласное или пологосекущее по отношению к вмещающим палеозойским осадочным породам, представленным известняками, мергелями, песчаниками, аргиллитами и углисто-глинистыми сланцами. Мощность интрузий несколько возрастает в направлении их падения и достигает 100—350 м. Оруденение представлено пирротинном, халькопиритом, пентландитом с подчиненным количеством пирита и миллерита. Оно приурочено к придонным частям интрузий и близлежащим участкам подстилающих пород; проявляется в виде вкрапленности и иногда — гнезд и жильных тел. Распределение сульфидов в рудных горизонтах неравномерное, их среднее содержание составляет 4—5% [117]. Для района характерна плохая обнаженность. Эрозионным срезом вскрыта лишь небольшая часть известных интрузий, а рудоносные горизонты вскрыты на весьма ограниченных участках. Отсюда вытекают следующие задачи:

- 1) выявление дифференцированных интрузий основных пород;
- 2) оценка рудоносности интрузий;
- 3) выявление рудных тел и оценка их промышленного значения.

Первая задача решается геологическим картированием совместно с гравитационными и магнитными съемками. Вторая и отчасти третья задачи решаются с помощью метода ВП. Третья — поисковым и разведочным бурением.

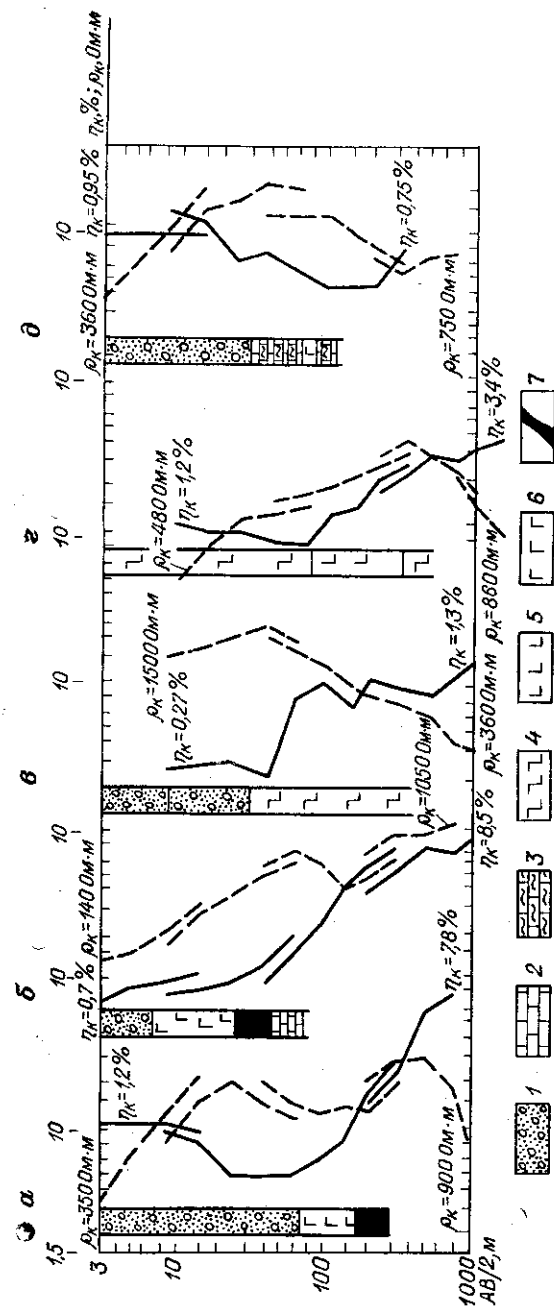


Рис. 155. Графики  $\eta_k$  и  $\rho_k$  вертикальных зондирований в Норильском районе (по А. М. Вольхину [50]).

а, б — над рудоносными интрузиями; в — над базальтами; г — над безрудной интрузией; д — над осадочными породами.  
1 — рыхлые отложения; 2 — известняки; 3 — мергели; 4 — базальты; 5 — габбро-диориты; 6 — габбро-диабазы; 7 — сульфидные руды.

Первые опытные работы по методу ВП проведены в 1958—1959 гг. Норильской экспедицией [117]. Учитывая морфологию и условия залеганий интрузий, в качестве основного вида работ выбрали вертикальное зондирование. В итоге исследований на двух месторождениях и на безрудных участках установили, что девонские осадочные породы и базальты характеризуются низкой поляризуемостью (не более 2,5%), над рудоносными интрузиями габбро-диабазов  $\eta_k$  повышается до 9—10%. Над практически безрудной интрузией габбро-долеритов, содержащих редкую вкрапленность сульфидов, значение  $\eta_k$  не превышало 5%. Характерным оказалось взаимоотношение графиков  $\eta_k$  и  $\rho_k$ : на безрудных участках рост  $\eta_k$  сопровождался повышением  $\rho_k$ , а над рудными телами, наоборот, увеличение  $\eta_k$  сопровождалось уменьшением  $\rho_k$  (рис. 155). Эти закономерности были подтверждены последующими опытными и производственными работами [50]. Было обращено внимание на то, что базальты повышенными значениями  $\eta_k$  (до 5%) отмечаются только тогда, когда они перекрывают рудоносную интрузию, между тем как вне пределов интрузии кажущаяся поляризуемость над базальтами и другими эффузивными породами не превышает 2%. Интенсивный метаморфизм вмещающих пород считается одним из признаков рудоносности интрузий, и повышенные значения  $\eta_k$  над породами, перекрывающими их, могут служить косвенным признаком перспективности интрузий.

На тех участках, где рудоносный горизонт выходит под наносы, А. М. Волыхин [50] опробовал установку симметричного профилирования и убедился, что по графикам  $\eta_k$  можно оконтурить рудный горизонт.

В целом проведенные исследования показали, что метод ВП может решать задачи оценки перспективности интрузий и картирования рудоносного горизонта. Кроме того, в ряде случаев по графикам  $\eta_k$  можно разделять изверженные и осадочные породы, что делать по графикам  $\rho_k$  при наличии многолетней мерзлоты затруднительно. Осадочные породы от изверженных отличаются низкой поляризуемостью (около 1 по сравнению с 2—3%). Сделанные на основании данных метода ВП прогнозы о рудоносности интрузий или об ее отсутствии подтвердились после бурения скважин [50], и метод ВП был с успехом применен для оконтуривания и уточнения строения рудоносной интрузии, к которой приурочено медно-никелевое месторождение [49, 288].

В Воронежской области перед методом ВП стоят задачи изучения интрузий, выделяемых с помощью гравиметрической и магнитной съемки, и поисков внутри крупных интрузий зон с высокой концентрацией электропроводящих минералов. Большая мощность осадочного чехла над рудоносными породами фундамента вынуждает использовать большие разности токовых электродов (до 2 км при работе с одиночной электроразведочной станцией и до 4—6 км при работе со спаренной генераторной установкой). Это создает определенные технические трудности в осуществлении работ мето-

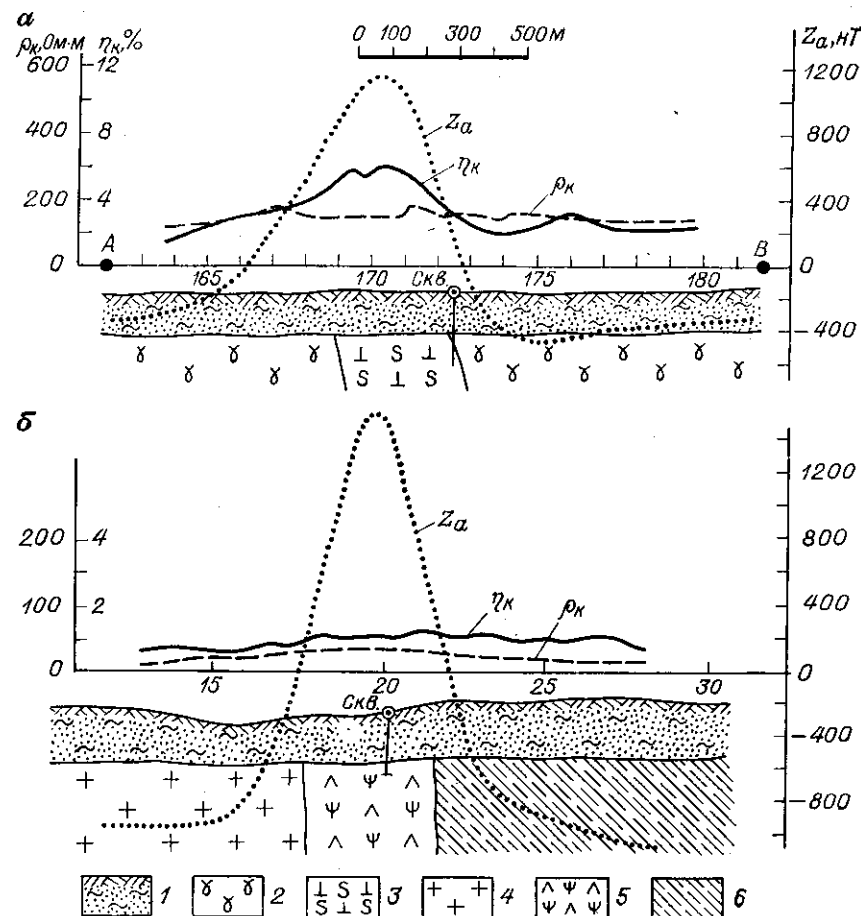


Рис. 156. Графики  $\eta_k$ ,  $\rho_k$  срединного градиента и аномального магнитного поля  $Z_a$  над рудоносной (а) и над безрудной интрузией (б) в Воронежской области [215].

1 — осадочные породы платформенного чехла; 2 — гнейсы; 3 — рудоносные серпентинизированные перидотиты; 4 — гранитоиды; 5 — габбро-амфиболиты; 6 — метаморфические сланцы.

дом ВП и удорожает их. Однако метод ВП остается пока единственным решающим указанные задачи при мощности осадочных пород по меньшей мере до 100 м [33, 215].

О значении метода ВП можно судить по примерам, описанным Н. А. Пишпаревой. Из 10 гравитационно-магнитных аномалий, считавшихся перспективными, аномалиями ВП отметились только три. Именно на этих трех участках бурением выявлены рудопроявления сульфидного никеля. Не было случая, чтобы сульфидоносные интрузии не фиксировались аномалиями ВП. С другой сто-

роны, тела безрудных основных и ультраосновных пород, создающие магнитные аномалии, обычно аномалий ВП не дают. На рис. 156 показаны графики  $\eta_k$ ,  $\rho_k$  и  $Z_n$  на двух участках со сходными магнитными аномалиями. На первом из них обнаружена четкая аномалия ВП и скважина встретила перидотиты с повышенными содержаниями сульфидов и никеля. На втором участке аномалии ВП не оказалось и скважина вскрыла габбро-амфиболиты без существенных концентраций сульфидов.

Н. А. Пишпарева обратила внимание, что аномалии ВП встречаются только над теми серпентинизированными перидотитами, в которых за счет гидротермального воздействия образовался вторичный магнетит. Максимумы аномалии ВП часто приурочены к краевым частям тел ультраосновных пород, где происходило наибольшее взаимодействие интрузий с вмещающими породами.

В Северном Прибайкалье геологическая обстановка напоминает Печенгский район, и здесь сульфидно-никелевые тела отмечаются высокими (до 30—50%) значениями кажущейся поляризуемости. По мнению геофизиков [190], всем выявленным зонам оруденения предшествовало обнаружение соответствующих им аномалий поляризуемости, естественного поля и др.

Среди зарубежных работ можно отметить исследования Г. Сигела в районе крупнейшего канадского месторождения Седбери [405], а также сообщение С. Паркера об открытии с помощью метода ВП большого тела сульфидно-никелевых руд в Австралии, в 30 милях к югу от города Калгурли [91]. Работы в Австралии провела фирма «Мак-Фар» по контракту с местной горнорудной компанией, которая в 1966 г. обнаружила в породах докембрийского щита лентообразное рудное тело мощностью до 15—20 футов и длиной в несколько сотен футов, содержащее в среднем 4% никеля. Поиски проводили в окрестностях первого рудного тела и завершили бурением на аномалии ВП скважин, вскрывших на глубине 150 футов приуроченное к контакту серпентинитов и вулканогенно-осадочных пород тело массивных сульфидных руд мощностью несколько десятков футов.

Силикатные никелевые руды сами по себе не являются электронными проводниками и не должны, казалось бы, представлять удобного объекта для метода ВП. Однако, судя по материалам Мугоджарской геофизической экспедиции, месторождения силикатных руд оконтуриваются методом ВП, поскольку аномалиями ВП отмечаются те богатые сульфидной вкрапленностью серпентиниты, в коре выветривания которых накапливается никель.

#### Сурьма

Антимонит, являющийся основным сырьем для получения сурьмы, к числу электропроводящих минералов не относится. Но рудные залежи сопровождаются вкрапленностью пирита, арсенопирита и других электропроводящих минералов, что создает определенные предпосылки для применения метода ВП [66].

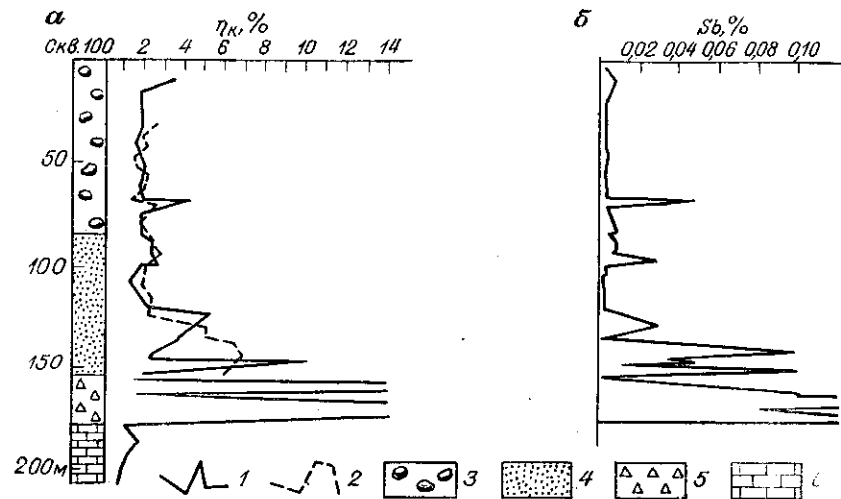


Рис. 157. Графики поляризуемости (а) и содержания сурьмы (б) в породах сурьмяного месторождения в Киргизии (по А. М. Волюхину [51]).

Графики: 1 — поляризуемости образцов керна, 2 — наблюдений по схеме трехэлектродного профилирования; 3 — конгломераты; 4 — песчаники; 5 — рудоносная кварцевая брекчия; 6 — известняки.

Исследования А. М. Волюхина в Южной Киргизии [51] показали, что пирит, количество которого в рудных залежах невелико, имеет широкое распространение в надрудных сланцах и песчаниках, так что в сводовых частях рудоносных антиклинальных структур образуются отчетливо выраженные плащеобразные пиритовые ореолы. Измерения поляризуемости керна и каротажные измерения в скважинах, пример которых дан на рис. 157, привели к выводу, что максимальной поляризуемостью обладает рудовмещающая брекчия. По направлению к подстилающим карбонатным породам наблюдается резкое уменьшение поляризуемости. В надрудной толще повышенное содержание пирита сопровождается повышением поляризуемости по сравнению с породами, подстилающими рудные залежи. Ширина зоны пиритизации в надрудной толще составляет 80—160 м.

Обращает на себя внимание четкая корреляция между поляризуемостью и содержанием сурьмы в породе даже при низком ее содержании (0,01—0,1%).

А. М. Волюхин [51] рекомендовал при поисках скрытых месторождений сурьмы проводить площадную съемку методом ВП, затем с помощью вертикальных зондирований оценивать глубину залегания известняков и сульфидной минерализации. Заданию проверочных скважин должно предшествовать выявление взаимоотношений зон сульфидной минерализации и рудоконтролирующих контактов пород.

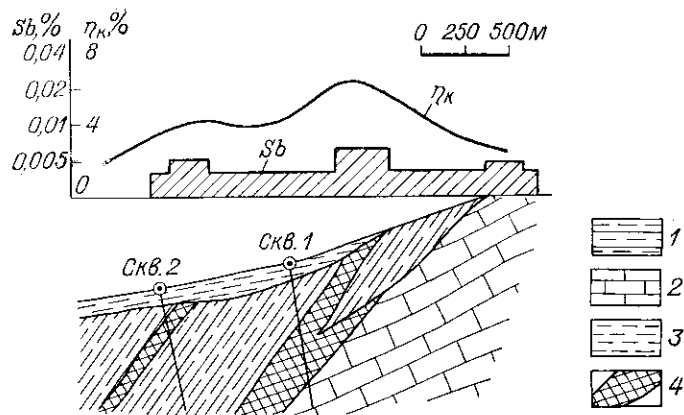


Рис. 158. Результаты работ методом ВП и литохимической съемки на сурьмяном рудопоявлении в Центральном Таджикистане [17].  
1 — глинистые и хлорито-серцитовые сланцы; 2 — известняки; 3 — рыхлые отложения; 4 — рудные тела.

В Центральном Таджикистане различают два вида сурьмяных и ртутных тел. Пластообразные залежи находятся вблизи контакта известняков с перекрывающими их глинистыми, кремнистыми и другими сланцами. Секущие тела приурочены к зонам разломов в терригенных и вулканогенных породах. Те и другие тела сопровождаются ореолами пирита, арсенопирита или графита. При поисковых работах критерием служит корреляция аномалий ВП с ореолами сурьмы или ртути. В. Н. Базаров и И. П. Степанов [17], из статьи которых взят пример, воспроизведенный на рис. 158, отметили, что сочетание геохимических съемок с методом ВП привело к открытию скрытых рудных тел.

Положительные результаты дало применение метода ВП на Амасийском сурьмяно-мышьяковом месторождении в Армении [16].

### МЕСТОРОЖДЕНИЯ РЕДКИХ МЕТАЛЛОВ

Минералы, служащие сырьем для извлечения олова, вольфрама, молибдена, кобальта, висмута и ртути, во-первых, не создают достаточно больших скоплений, во-вторых, большей частью не являются электронными проводниками. Поэтому прямое выявление редкометалльных залежей, как правило, методу ВП не доступно. Однако на многих месторождениях и плохо проводящие касситерит, вольфрамит, шеелит, висмутин, киноварь, и электропроводящие станнин, молибденит, кобальтин, метациннабарит ассоциируют с пиритом, пирротином, арсенопиритом, халькопиритом и марказитом, образующими скопления, которые могут обусловить заметные аномалии ВП. Кроме того, нередко комплексные месторождения: оловянно-полиметаллические, медно-вольфрамовые,

медно-молибденовые, кобальто-медно-никелевые, кобальто-полиметаллические, — которые по условиям геофизических работ не отличаются от более простых по составу медных и полиметаллических месторождений, рассмотренных выше.

В промышленных рудах содержание редких металлов составляет десятые и сотые доли процента. Поэтому в большинстве случаев только по данным химического анализа можно определить значение сульфидоносных залежей, обнаруживаемых с помощью метода ВП. При первичной оценке аномалий ВП особенно большую роль приобретают геохимические исследования не только вторичных, но и первичных ореолов рассеяния редких металлов и их спутников. Комплексное применение геофизических и геохимических методов обеспечивает наиболее объективное и надежное выделение потенциально рудоносных площадей.

### Олово

Гидротермальные касситерито-сульфидные месторождения, распространенные на Дальнем

Востоке, отмечаются довольно интенсивными аномалиями кажущейся поляризуемости, особенно при скважинных исследованиях

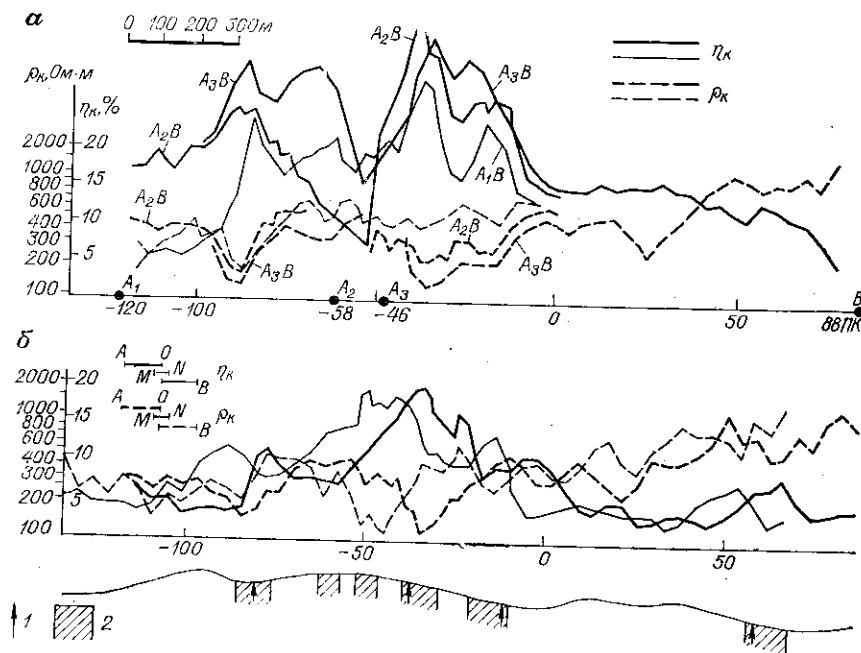


Рис. 159. Графики  $\eta_k$  и  $\rho_k$  для установок градиента (а) и комбинированного профилирования (б) над касситерито-сульфидными телами (по материалам Приморской геофизической экспедиции).

1 — «обратные» пересечения графиков  $\eta_k$  комбинированного профилирования; 2 — «локальные» зоны высокой поляризуемости.

[234]. Эти аномалии обычно охватывают целиком рудные зоны, так что картирование таких зон не представляется сложной проблемой. Труднее выделять рудные жилы и линзы, которые несут в себе наряду с сульфидами железа минералы олова.

О характере графиков, получаемых над касситеритово-сульфидными месторождениями, можно судить по рис. 159, где приведены результаты съемки с установкой градиента при трех положениях электрода  $A$  (второй токовый электрод оставался неподвижным) и с установкой комбинированного профилирования ( $AO = OB = 100$  м,  $MN = 40$  м). Жильная зона в целом отмечается высокими значениями кажущейся поляризуемости (до 10–30%), на фоне которых максимумами  $\eta_k$  и понижениями  $\rho_k$  отмечаются отдельные жилы или их группы. Аномалии  $\eta_k$  максимального значения достигают при расположении токового электрода над головой той или иной жилы, и с установкой градиента можно достичь наибольшей разрешающей способности. Аномалии, устанавливаемые по данным комбинированного профилирования хотя и несколько слабее, но вполне четкие, за исключением средней группы близко расположенных жил, из которых «обратным» пересечением графиков  $\eta_k$  и «прямым» пересечением графиков  $\rho_k$  отмечается только центральная, наиболее мощная и проводящая жила.

В. Н. Земцов, работая в Северном Приморье, теоретически обосновал и на практике широко применил дипольную установку. При площадных съемках масштаба 1 : 50 000 и 1 : 10 000 он использовал диполи  $AB = MN = 100$  м или  $AB = MN = 50$  м, расстояние между центрами диполей 150 и 75 м. Для определения глубины тел он прибег к дипольным зондированиям, считая точкой записи центр установки. В. Н. Земцов пришел к выводу, что вкрапленность сульфидов присуща всем оловорудным полям и абсолютному большинству рудных тел. С помощью профилирования методом ВП выявляются зоны сульфидной минерализации, перспективные на рудоносность. Одновременно по значению  $\rho_k$  оценивают степень вторичных изменений пород, выражающихся в их ороговиковании и окварцевании. Важное значение имеет оценка глубины эрозионного среза и объемного распределения сульфидов. Месторождения, в центре оловорудные, на флангах переходят в полиметаллические. Поэтому важны исследования вторичных и первичных геохимических ореолов.

На рис. 160 даны результаты исследований профилирования дипольной установкой. Аномалия  $\eta_k$  приурочена к долине ручья, заполненной рыхлыми отложениями мощностью до 50 м, и не сопровождается литохимическим ореолом. Именно здесь проверочными работами вскрыта новая рудная зона. В остальной части профиля аномалиями отмечены ранее известные рудные зоны, выходящие к дневной поверхности.

Гидротермальные касситеритово-кварцевые месторождения уступают по своим размерам сопровождающим их ореолам сульфидной вкрапленности месторождениям первого типа. Вместе

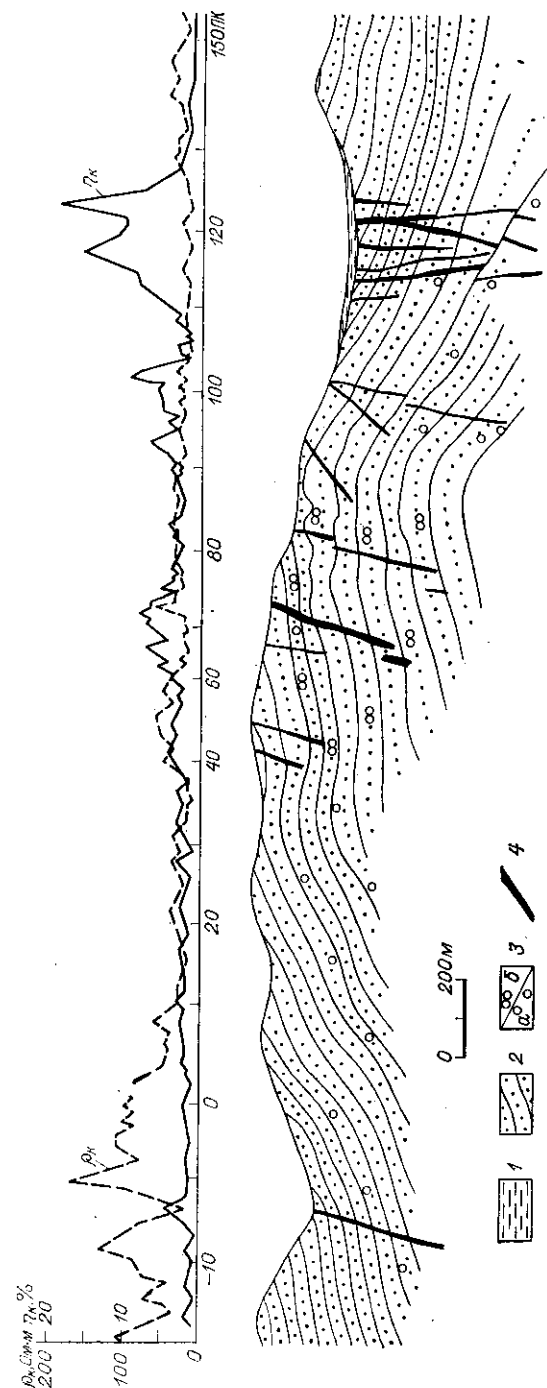


Рис. 160. Графики  $\eta_k$  и  $\rho_k$  дипольного профилирования над оловорудным месторождением в Северном Приморье (по В. Н. Земцову).

1 — аллювиальные отложения; 2 — алевриты и песчаники; 3 — гидротермальные изменения пород (а — слабые, б — интенсивные); 4 — рудные зоны.

с тем, как показали работы в Киргизии [45], касситеритово-кварцевые месторождения тоже отмечаются аномалиями ВП, причем между содержанием олова и сульфидов в рудных телах установлена корреляционная связь. Хотя рудные тела из-за небольшой мощности геофизическими методами непосредственно не выделяются, зоны сульфидной минерализации, содержащие эти тела, прослеживаются довольно уверенно. Вероятность нахождения оловорудных тел в малосульфидных блоках пород, не выделяющихся по поляризуемости, относительно невелика.

На зарубежных месторождениях в Канаде и в Англии главную роль играют геохимические методы, хотя на касситеритово-сульфидных залежах в Корнуолле успешно применяется также метод вызванной поляризации [375].

#### Вольфрам и молибден

На многих месторождениях вольфрамовые и молибденовые минералы встречаются совместно, и косвенные поиски тех и других геофизическими методами проводят одновременно. Таковы месторождения кварцевожильно-грейзеновой формации в Центральном Казахстане, приуроченные к апикальным частям пермских интрузий лейкократовых гранитов. Сведения о положении и морфологии интрузий дают магнитные и гравитационные съемки, а о наличии рудной минерализации — геохимические съемки [68]. Изучение типоморфного комплекса вторичных ореолов рассеяния вольфрама, молибдена, висмута, олова, свинца, цинка и меди позволяет оценить размеры оруденения и его вещественный состав. В некоторых случаях редкометалльные месторождения выделяются по отрицательным аномалиям естественного электрического поля, но чаще — по аномалиям кажущейся поляризуемости (до 5—7%), связанным с прожилковой и вкрапленной пиритизацией пород рудной зоны.

В Южном Казахстане группа медно-молибденовых месторождений и рудопоявлений располагается в зонах тектонических нарушений и повышенной трещиноватости пород среди интрузий кислого и среднего состава. Гидротермальные жильные тела имеют крутое падение. Работы методом ВП проводят установкой комбинированного профилирования в зонах тектонических нарушений, выявленных по данным геологической съемки и магнитометрии. Литохимические данные помогают отделять рудоносные разломы от безрудных.

В итоге, как отметили А. Т. Канеев и В. В. Слащинин [114], на одном из разведываемых месторождений методом ВП были четко прослежены основные рудные зоны, причем по интенсивности аномалий ВП удалось охарактеризовать степень оруденения вновь выявленных зон и с учетом того, что одна из них была разведана ранее, определить перспективы всего участка. Два примера графиков  $\eta_k$  и  $\rho_k$  комбинированного профилирования над рудными телами даны на рис. 161.

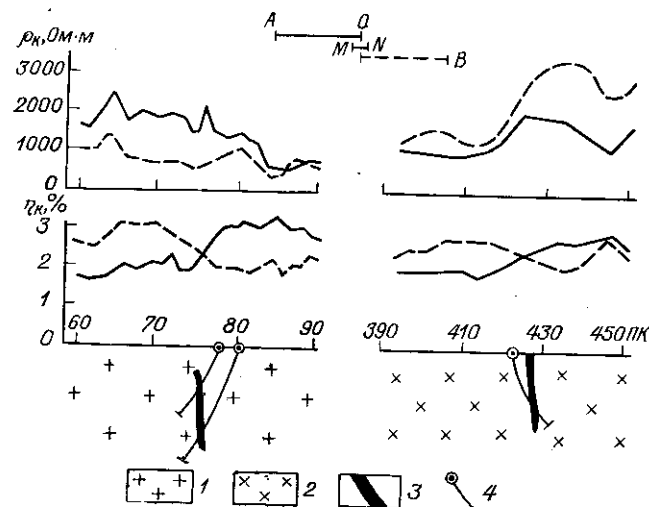


Рис. 161. Графики  $\eta_k$  и  $\rho_k$  комбинированного профилирования над медно-молибденовыми рудными телами в Южном Казахстане [114].  
1 — биотитовые граниты; 2 — гранодиориты; 3 — рудные тела; 4 — скважины.

На другом участке в том же районе при проверке магнитной аномалии обнаружено тело пироксено-магнетитовых скарнов протяженностью более 1 км, в пределах которого была установлена медная минерализация. Последующей съемкой по методу ВП с привлечением металлометрических данных здесь выявлена серия новых зон рудной минерализации [114].

В соседнем Саякском рудном районе, несмотря на большой объем литохимических и магнитных съемок, проведенных на территории 1400 км<sup>2</sup>, долгое время поиски рудных тел были безуспешными [208]. В 1967 г. на известном с 1953 г. ореоле рассеяния вольфрама и молибдена проведены детальные геофизические и геохимические работы, сопровождавшиеся крупномасштабной геологической съемкой. В пределах ореола вольфрама и молибдена, приуроченного, как выяснилось, к эндоконтакту интрузии гранодиоритов с вулканогенно-осадочными породами, выявлена небольшая по интенсивности, но четкая аномалия кажущейся поляризуемости (4—5 на фоне 2—3%). Здесь же по высоким значениям  $\rho_k$  выделили зону окварцованных и измененных пород. При первом же обследовании мест, где максимальные содержания вольфрама и молибдена в делювии совпали с аномалиями  $\eta_k$  и  $\rho_k$ , в кварцевых прожилках обнаружили вкрапленность шеелита и более редкую — молибденита. Затем сетью канав были вскрыты штокверковые зоны вольфрамо-молибденового оруденения. В итоге комплексных поисковых работ выявлено оруденение, установлены его размеры и состав, а также характер околорудных изменений пород, выразившийся в окварцевании, амфиболизации и слабой пиритизации.

Найденное рудопроявление было передано под разведку глубокими скважинами.

Казахстанские геофизики [209] обстоятельно исследовали влияние гидротермальных изменений на физические свойства пород на рудопроявлениях, где молибденовая (фемолитовая) минерализация приурочена к областям широкого развития березитов. Установлено, что в интервалах скважин, где содержание молибдена превышает фоновое, магнитная восприимчивость уменьшается, а поляризуемость увеличивается. Поляризуемость измененных пород со спорадической сульфидной минерализацией (среднее содержание сульфидной серы 0,07%) составляет в среднем 3,1, в то время как в неизмененных породах поляризуемость не превышает 1—1,5%. Наблюдается также повышение поляризуемости образцов, отобранных вблизи разрывных структур, контролирующих слепое молибденовое оруденение; поляризуемость колеблется от 2 до 9, между тем как содержание сульфидной серы меняется от 0,02 до 0,04%. У неизмененных фельзитов поляризуемость не превышает 1,8% при среднем содержании серы 0,01%.

Статистический анализ изучения более 100 образцов показал, что коэффициент пропорциональности между избыточной поляризуемостью и содержанием сульфидной серы равен 5,3. Между сульфидной серой и сульфидным железом с вероятностью 99,99% установлена линейная корреляционная зависимость, что позволило считать, что основным электропроводящим минералом является пирит. Коэффициент пропорциональности между избыточной поляризуемостью и содержанием пирита нашли равным 2,8.

На всех участках с молибденовой минерализацией среди кислых пород отметили увеличение поляризуемости даже при слабой пиритизации. Авторы работы [209] связали его с широким развитием среди гидротермально измененных пород таких минералов, как серицит, хлорит, каолинит, влияющих на мембранную вызванную поляризацию. Поляризуемость пород оказалась как-то связанной с их цветовой окраской. Светло-зеленые слабо измененные фельзиты имеют среднюю поляризуемость 2,2, измененные буро-зеленые фельзиты — 2,8, а черно-серые — до 8,2%. Уменьшение магнитной восприимчивости объяснили замещением магнетита пиритом под воздействием метасоматических растворов.

Исследованы также причины высокой поляризуемости углисто-кремнистых сланцев, с которыми связаны рудопроявления молибдена. Установлена довольно четкая пространственная связь аномалий поляризуемости с высоким содержанием углерода в породах. При близких содержаниях углерода метаморфизованные сланцы имеют тем более высокую поляризуемость, чем в большей степени углистое вещество превращено в графит. Наибольшая поляризуемость отмечена в графитизированных сланцах, содержащих рассеянную вкрапленность пирита.

В Бурятии хорошие результаты получены на молибденовых месторождениях штокверкового типа, приуроченных к мезозой-

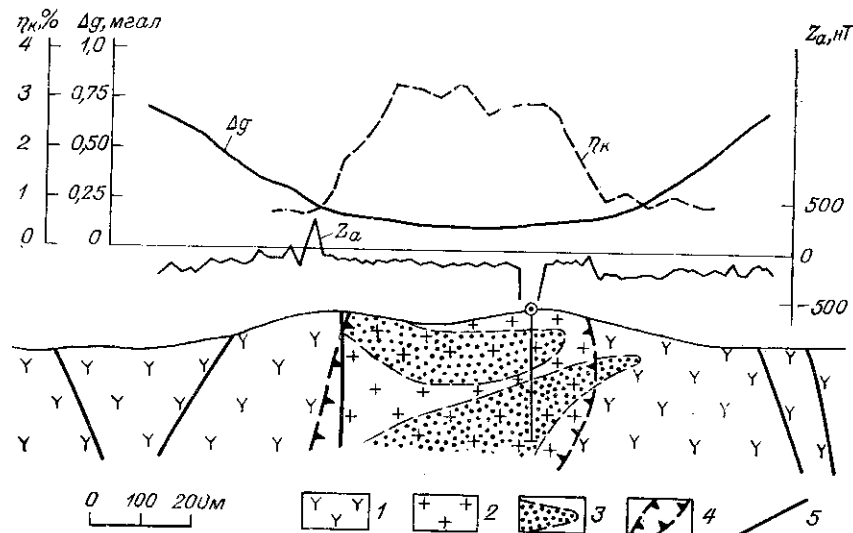


Рис. 162. Графики  $\eta_k$ ,  $\Delta g$  и  $Z_a$  над молибденовым месторождением в Бурятии (по Е. Б. Адрову и П. В. Роксину).  
1 — сиениты; 2 — гранит-порфиры; 3 — рудные тела; 4 — зона штокверка; 5 — разломы.

ским гранитоидам и контролируемых разрывными нарушениями различного простираия. Гидротермальная проработка ослабленной зоны на месторождениях подобного типа сопровождается сульфидной минерализацией, представленной пиритом, халькопиритом и немного сфалеритом и галенитом. Иногда встречается магнетит. Молибденит имеет прожилково-вкрапленную текстуру.

На рис. 162 показан пример графиков кажущейся поляризуемости, локальных аномалий силы тяжести  $\Delta g$  и магнитного поля  $Z_a$ . Измерения методом ВП выполнены с помощью станции ВПС-63 по схеме срединного градиента ( $AB = 1000$  м,  $MN = 20$  м,  $t_3 = 2$  мин,  $t = 0,5$  с). Аномалией ВП отмечается вся штокверковая зона. Значения  $\eta_k$  достигают 3,5 при фоне до 1%.

На Северном Кавказе А. Е. Гезин [57] провел опытные работы на одном из молибденовых рудопроявлений скарнового типа, приуроченном к биотитовым роговикам и представленном редкой вкрапленностью и мелкими прожилками пирита, халькопирита, галенита, сфалерита и молибденита. Рудоносные роговики зоной разлома отделены от пиритизированных вулканогенно-осадочных пород, не содержащих молибденита, но подвергнутых графитизации. Широкой аномалией ВП выделилась вся зона сульфидной минерализации и графитизации пород. Оконтуривание молибденоносных роговиков оказалось слишком сложной задачей. Более удачными были работы в подземных выработках на медно-молибденовом месторождении в Армении [7].

Вольфрамовые руды Приморья принадлежат к скарново-грейзеновой формации. Шеелит в рудах ассоциирует с апатитом, кварцем, пирротинном и другими сульфидами. Скарнирование с последующими грейзенизацией и сульфидизацией развито в экзоконтактах гранитоидных интрузий в карбонатных горизонтах палеозойских и мезозойских терригенных толщ. Существенную роль играет тектонический фактор. Термальное воздействие интрузий на содержащие органику алевролитовые пласты привело к их антрацитизации.

Физические свойства пород и руд шеелитовых месторождений Приморья исследовал В. Н. Земцов [100]. По его данным поляризуемость неизменных гранитов, диоритов, песчаников, алевролитов, роговиков, известняков, а также окисленной шеелито-сульфидной руды составляет от 0,5 до 1,8%. Грейзенизированные граниты, сульфидизированные роговики, грейзены и скарны с магнетитом и сульфидами имеют поляризуемость до 6—15, а шеелито-сульфидная неокисленная руда — от 3 до 20%.

Дипольное профилирование, выполненное в масштабе 1 : 10 000, показало, что главная рудная залежь месторождения наряду с прочими зонами жильной и прожилково-вкрапленной сульфидизации отмечается локальной линейной аномалией  $\eta_k = 5 \div 15\%$ . Площадные аномалии с значениями  $\eta_k$  десятки процентов связаны с антрацитизацией алевролитов-кремнистых пород.

На другом месторождении рудное поле, совпадающее со штоком грейзенизированных гранитов и приконтактовыми роговиками, отмечено повышением  $\eta_k$  до 4—8%. Однако рудные тела отмечаются понижениями  $\eta_k$  до 0,5—2%, которые В. Н. Земцов объяснил мощной зоной окисления руд и малой глубиной исследований, достигнутой при профилировании с разносом диполей 60 м.

Среди зарубежных работ наибольшее внимание привлекают исследования на месторождении Бренда и ряде других, расположенных в Британской Колумбии. В этой провинции Канады развитие горной промышленности началось благодаря освоению бедных по концентрации молибдена и меди, но крупных по размерам месторождений вкрапленного типа. На месторождении Бренда объемная концентрация сульфидов составляет только 1%, однако она представлена в основном халькопиритом и молибденитом и в меньшей степени пиритом. Поэтому она представляет промышленный интерес. Прямое выявление зон сульфидной минерализации, осуществленное фирмой «Мак-Фар» с помощью метода ВП, сыграло видную роль в поисках месторождений указанного типа [358].

Некоторое осложнение при истолковании аномалий ВП вызвало то, что кроме широких, но слабых аномалий, сопутствующих медно-молибденовым телам, на контакте рудоносных гранодиоритов и вулканогенных пород обнаружили более узкие и интенсивные аномалии ВП, обусловленные пиритом и магнетитом. Для классификации аномалий ВП использовали их форму и интенсивность, а также результаты геохимических и магнитной съемки. Наиболее

перспективными считали аномалии ВП, подтверждаемые геохимическими ореолами рассеяния рудных элементов и соответствующие относительно низкому магнитному полю.

Та же фирма «Мак-Фар» успешно выполнила работы в Австралии (штат Квинсленд). Здесь методом вызванной поляризации была прослежена рудная зона, содержащая молибденит, вольфрамит, халькопирит, арсенопирит и пирит. Рудоносные грейзенизированные граниты перекрыты слоем метаморфизованных осадочных пород мощностью около 30 м.

Возможности метода ВП на ртутных месторождениях определяются не концентрацией плохо

проводящей киновари или хорошо проводящих метациннабарита и самородной ртути, которая всегда невелика, а концентрацией пирита, марказита и прочих более распространенных электропроводящих минералов. Последняя зависит от степени развития процессов сульфидного рудообразования и различна в разных районах.

Первые и довольно успешные работы методом ВП провел на руднике «Идрица» в западной части Югославии Ф. Шуми [411]. Исследования на ртутных месторождениях в СССР наиболее полно изложены в обзоре, составленном коллективом под руководством М. Н. Столпнера [65]. Здесь отмечается, что ртутные месторождения содержат (помимо ртутных) электропроводящие минералы: пирит, марказит, халькопирит, гематит, галенит. Широко проявленные процессы гидротермального изменения пород сопровождаются пиритизацией, характерной для кварцево-диккитового, карбонатного и лиственитового типов киноварной формации. На месторождениях джаспероидного типа антимонито-киноварно-реальгаровой формации пиритизация наиболее широко развита в надрудных сланцах, играющих роль экрана. Форма залежей, повторяющих контуры складчатых структур и приуроченных к ним джаспероидов, указывает на связь процесса пиритизации с рудообразованием, хотя в самих рудных телах пирит, как правило, не встречается.

На месторождениях кварцево-диккитового типа собственно киноварной формации пиритизация проявлена непосредственно в пределах рудоконтролирующего пласта песчаников, но образует обособленные гнезда. Повышенные концентрации пирита отмечаются в оруденелых зонах брекчирования среди сланцев на Палланском месторождении.

Месторождения карбонатного типа характеризуются тонкодисперсным распределением пирита и увеличением его концентрации в рудоносных известняках и битуминозных сланцах близ надвига (Акташское месторождение). На месторождениях лиственитового типа (Чонкой, Чаган-Узун) пиритизация встречается лишь на некоторых участках в виде вкрапленности и редких просечек.

Избыточная поляризуемость оруденелых горных пород на изученных месторождениях имеет следующие значения:

|                                        | %    |
|----------------------------------------|------|
| Западно-Палянское (Северо-Восток СССР) | 6—30 |
| Никитовское (Донбасс)                  | 4—8  |
| Дружковское (Донбасс)                  | 2—6  |
| Славянское (Донбасс)                   | 5—15 |
| Ключ Сухонький (Горный Алтай)          | 1—20 |
| Акташское (Горный Алтай)               | 2—15 |
| Вышковское рудное поле (Закарпатье)    | 4—10 |

Перед методом ВП главной задачей выступает выделение рудо-контролирующих структур по гидротермально измененным породам. В Южно-Ферганском сурьмяно-ртутном поясе плащеобразные надрудные зоны сульфидной минерализации имеют мощность до 100 м и более. Поляризуемость их достигает 15% и более, между тем как неминерализованные карбонатные и терригенные отложения имеют поляризуемость 2—4%. Здесь применяют площадную съемку методом ВП по схеме градиента в масштабе 1 : 25 000 и 1 : 10 000. Наиболее крупные и интересные аномалии  $\eta_k$  детализируют с помощью профилей ВЭЗ ВП для определения глубины залегания кровли известняков и зон пиритизированных пород [65].

В центральной части Западно-Палянского месторождения (рис. 163) аномалия  $\eta_k$  охватывает контур промышленного рудного тела и зону вкрапленного ртутного оруденения. Дальнейшее изучение скрытого оруденения в северной части зоны выполнено с помощью скважинного варианта метода ВП. По всем скважинам получили отчетливую корреляцию зон повышенной поляризуемости с участками развития пиритовой и киноварной минерализации.

В районе месторождения Б. Шаян Вышковского рудного поля зона оруденелых гидротермально измененных пород фиксируется аномалией  $\eta_k = 6 \div 7\%$ . Аналогичные результаты получены на других месторождениях Закарпатья.

В Центральном Таджикистане ртутные месторождения имеют форму пластообразных залежей, расположенных среди глинистых и кремнистых сланцев вблизи их контакта с известняками [66]. Характерные результаты ВЭЗ ВП над такими залежами приведены на рис. 164. Отчетливыми повышениями  $\eta_k$  до 5—7% отмечается вся рудоносная зона. Отдельные относительно небольшие залежи при такой съемке не выделяются.

Авторы обзора [65] пришли к выводу, что метод ВП должен широко внедряться на этапе поисков ртутных месторождений, характеризующихся наличием сульфидов железа в гидротермально

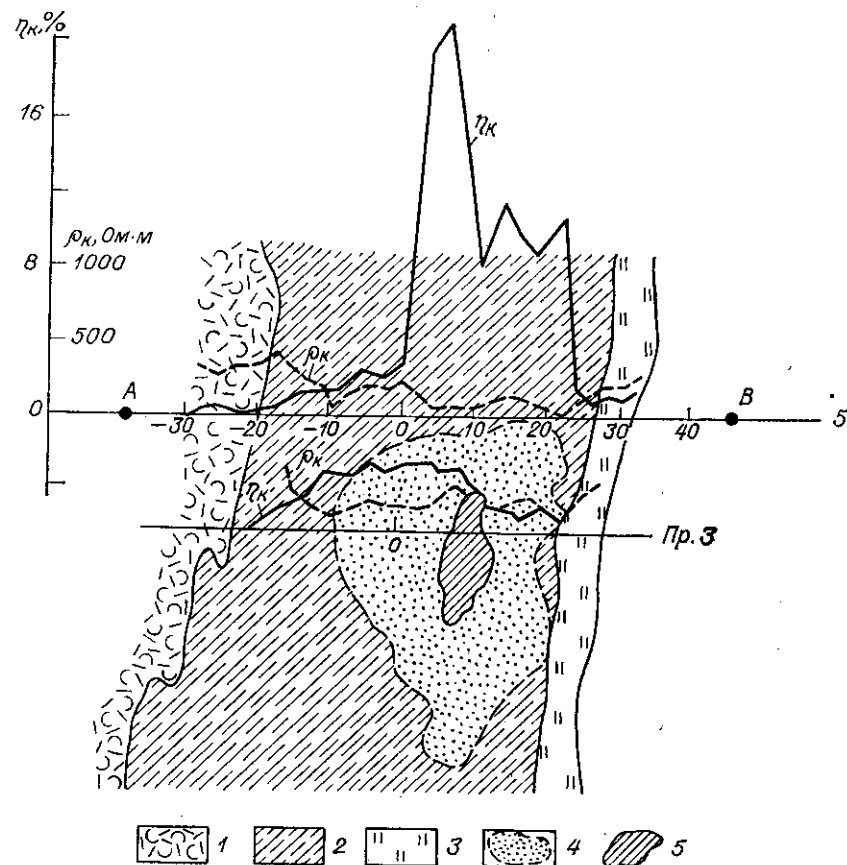


Рис. 163. Графики  $\eta_k$  и  $\rho_k$  в районе Западно-Палянского ртутного месторождения (по Б. Б. Шатрову и Г. А. Виллеру).

1 — туфы; 2 — сланцы; 3 — зона разлома; 4 — контур рудной минерализации; 5 — контур промышленного оруденения.

измененных околорудных и непосредственно оруденелых горных породах.

Заканчивая обзор результатов работ на редкометалльных месторождениях, следует упомянуть об успешном применении метода ВП на мышьяково-висмутовом месторождении в Узбекистане [31]. Небольших размеров и разнообразной формы рудные тела, содержащие самородный висмут, висмутин, арсенопирит и пирит, залегают среди известняков и контролируются тектоническими нарушениями. Обусловленные арсенопиритом и пиритом аномалии  $\eta_k$ , достигающие 5—10, а иногда 25%, оказались хорошим поисковым признаком. Это позволило использовать метод ВП как при назем-

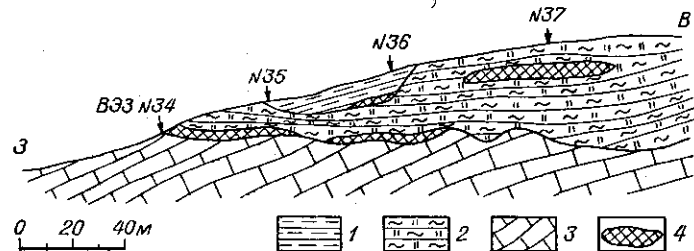
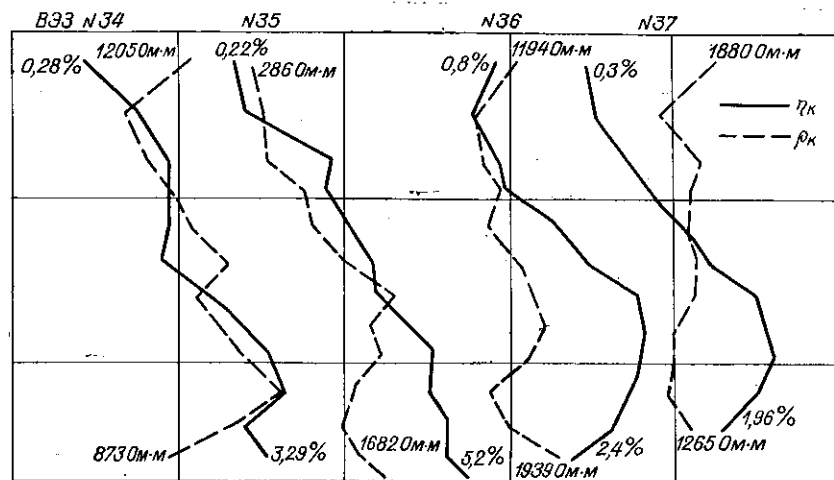


Рис. 164. Графики  $\eta_k$  и  $\rho_k$  вертикального зондирования над ртутным месторождением в Центральном Таджикистане [66].

1 — глинистые сланцы; 2 — кремнистые сланцы; 3 — известняки; 4 — рудные тела.

ной съемке на флангах известного месторождения, так и при его детальной разведке. В последнем случае применяли различные скважинные варианты метода ВП [268].

## МЕСТОРОЖДЕНИЯ БЛАГОРОДНЫХ МЕТАЛЛОВ

Подавляющая часть серебра извлекается из комплексных полиметаллических руд, а платины — из медно-никелевых сульфидных руд. Некоторые из рассмотренных выше полиметаллических и медно-никелевых месторождений могли бы служить примерами месторождений серебра и платины. Отчасти так же обстоит дело и с золотом, которое входит в состав полиметаллических, а иногда и медных руд многих месторождений. Вместе с тем, в отличие от серебра и платины, золото образует самостоятельные коренные месторождения, являющиеся специфическим объектом применения геофизических методов.

## Золото

Из перечисленных в табл. 28 шести промышленных типов месторождений золота четыре относятся к гидротермальным, в которых золото ассоциирует с сульфидами. Золотоносные кварцевые жилы часто сопровождаются значительной вкрапленностью сульфидов, заметно повышающей поляризуемость рудных зон, хотя сами малосульфидные кварцевые жилы поляризуются слабо. Колчеданно-золотые месторождения особенно удобны для применения метода ВП, поскольку часто промышленное значение имеют золотоносные пиритовые и арсенопиритовые вкрапленники, не выделяющиеся по электрической проводимости, плотности и магнитной восприимчивости.

Опыт работ в Северном и Центральном Казахстане, Горном Алтае и Западной Калбе, Восточном Забайкалье, Приморье, Таджикистане и Узбекистане показывает, что все золотые месторождения сульфидной формации отмечаются существенным повышением поляризуемости, обусловленным пиритизацией, а иногда графитизацией околорудных пород [1, 17, 47, 210, 224, 236, 251, 252]. Площадь аномалий ВП часто в десятки и сотни раз превышает площадь золотого оруденения. Это облегчает проведение мелкомасштабных поисковых съемок, но одновременно требует детального анализа аномалий, выделения «региональных» и «локальных» аномалий. Примером такой съемки служат работы в Западном Узбекистане (рис. 113 и 114).

Обнаружить рудные тела невозможно без комплексных геологических и геохимических исследований. Образцом их служат поиски золоторудных месторождений в Северном Казахстане, описанные В. А. Кличниковым, М. Д. Морозовым, Л. П. Жоголевым и др. [213]. В этом районе геофизические методы играют весьма важную роль. Положение региональных интрузивно-тектонических зон, контролирующих размещение золоторудных месторождений, устанавливают по характерным особенностям магнитного и гравитационного полей. Затем картируют малые интрузии и тектонические нарушения, в пределах и окрестностях которых с помощью метода ВП выявляют зоны вкрапленной сульфидной минерализации, обычно сопровождающей золотое оруденение.

В качестве непосредственных признаков оруденения выступают ореолы рассеяния элементов-спутников золота: мышьяка, молибдена, серебра, меди, свинца. Параметры этих ореолов часто соответствуют геохимическим и другим количественным характеристикам рудных зон, и с их учетом оценивают аномалии ВП. Совокупность полученных данных, как правило, достаточна для рационального размещения горных выработок и поисково-разведочных скважин.

В Восточном Забайкалье методом ВП, по свидетельству Р. Г. Вовченко и Н. Ф. Радченко [47], отмечаются все известные рудные зоны и зоны повышенной пиритизации с самым разнообразным содержанием золота. А. А. Солодов [275], Р. С. Сейфул-

лин, Ю. С. Гребенщиков, В. И. Красников [251] указали на большие возможности метода ВП при поисках месторождений дарасунского типа. Кварцево-сульфидные руды Дарасунского месторождения обладают поляризуемостью до 80%, между тем как поляризуемость вмещающих пород не превышает 2%. Дарасунское рудное поле отмечается аномальными значениями  $\eta_k$ , достигающими 20—32%, его можно картировать методом ВП в масштабе 1 : 50 000. Преимущество метода ВП, по сравнению с более дешевым методом естественного поля, заключается в большей разрешающей способности при выявлении вкрапленного оруденения и меньшей чувствительности к влиянию гидрогеологических условий и к изменению вещественного состава сульфидных руд. В комплексе с магнито-разведкой, литохимической съемкой и другими методами электро-разведки методом ВП на Дарасунском рудном поле выявлены золотоносные кварцево-сульфидные жилы, а также прослежены по простиранию ранее известные жилы.

Те же авторы [251] отметили, что в Шахминском районе Восточного Забайкалья золотые россыпи приурочены к гидротермально измененным породам и над ними имеются аномалии ВП. В этих условиях метод ВП перспективен для поисков россыпных месторождений.

В Карамазарском рудном районе Центрального Таджикистана кварцево-золото-сульфидные месторождения приурочены к мало-мощным зонам дробления в песчаниках и сланцах. Проведенное В. Н. Базаровым и А. Н. Балашевым изучение поляризуемости пород и руд в штольнях и скважинах таких месторождений показало, что песчано-сланцевые отложения имеют устойчивые значения поляризуемости 1—2%. На этом фоне уверенно выделяются аномалии  $\eta_k = 8\div 12\%$ , соответствующие зонам сульфидной минерализации. В показанном на рис. 165 примере в пяти скважинах выделено семь аномалий  $\eta_k$ , из которых, судя по результатам последующего опробования керна, пять связаны с золотым оруденением, а две с безрудной генерацией пирита.

В том же Карамазарском районе имеются золото-мышьяковые месторождения, связанные с сульфидизированными скарнами на контактах малых интрузий гранитоидов. Использование метода ВП вместе с магнито-разведкой направлено на поиски зон скарнирования и ороговикования. Среди выявленных восьми аномалий ВП три связаны с известными рудными телами. На одном из новых участков на аномалии ВП выполнены проверочные геологические работы и выявлено рудопроявление [299].

Скважинные варианты метода успешно применяют на этапах поисков и разведки золоторудных месторождений. Благодаря им повышается надежность обнаружения рудных тел, установления их формы и корреляции тел между горными выработками. Одновременно удается уменьшить число необходимых скважин. Например, на Майкаинских месторождениях в Центральном Казахстане внедрение методов скважинной геофизики позволило раз-

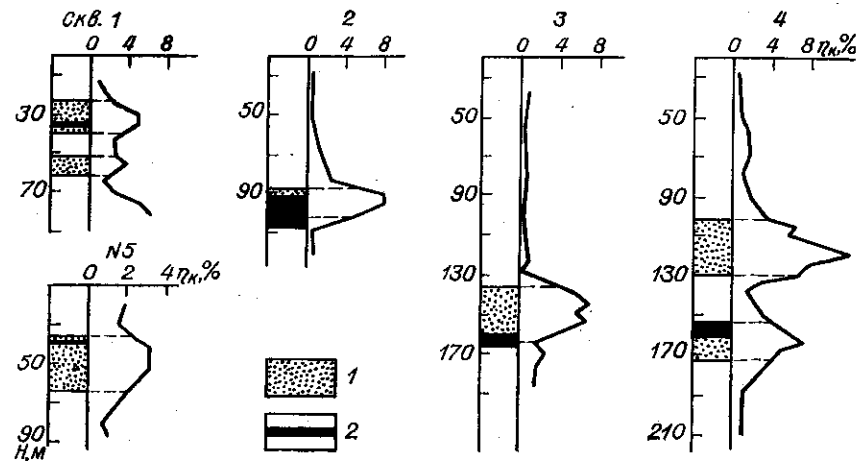


Рис. 165. Графики  $\eta_k$  каротажа скважин на кварцево-золотосульфидном месторождении в Центральном Казахстане (по В. Н. Базарову и А. Н. Балашеву). 1 — зоны сульфидной минерализации по данным метода ВП; 2 — рудные тела, выявленные опробованием керна.

редить сеть поисковых скважин с  $50 \times 100$  до  $50 \times 200$  м. На одном участке из 47 скважин, предусмотренных первоначальным проектом, было пройдено только 23, объем бурения сократился на 3500 м, экономия составила 50 тыс. руб. [43]. В том же районе, благодаря исследованию скважин методом ВП, обнаружено несколько рудных тел, пропущенных при разведочном бурении. Примером служит рис. 166.

Сначала были пробурены скв. 487 и 401, встретившие на глубине соответственно 175—190 и 120—125 м небольшие по мощности пирито-сфалеритовые рудные зоны, четко отмечаемые максимумами кажущейся поляризуемости при каротажных измерениях.

На тех же интервалах скважин имеются максимумы на графиках  $\eta_k$ , полученных при заземлении в обсадные трубы этих скважин. Но кроме этих максимумов в скв. 487 имеется еще один максимум  $\eta_k$  на глубине 90—130 м, где при каротажных измерениях наблюдалось некоторое понижение  $\eta_k$ . Такое соотношение графиков кажущейся поляризуемости послужило признаком, что вблизи скв. 487 имеется еще одно рудное тело на глубине 90—130 м. Дополнительное бурение рекомендованной геофизиками скв. 493 привело к обнаружению между скв. 487 и 401 на глубине 100—150 м новой рудной зоны, которую проследили по простиранию с учетом данных метода ВП.

В. Е. Ланда [173], анализируя перспективы скважинной геофизики на полиметаллических месторождениях Восточного Забайкалья, пришел к выводу, что скважинные модификации метода ВП найдут широкое применение при изучении участков с золотым

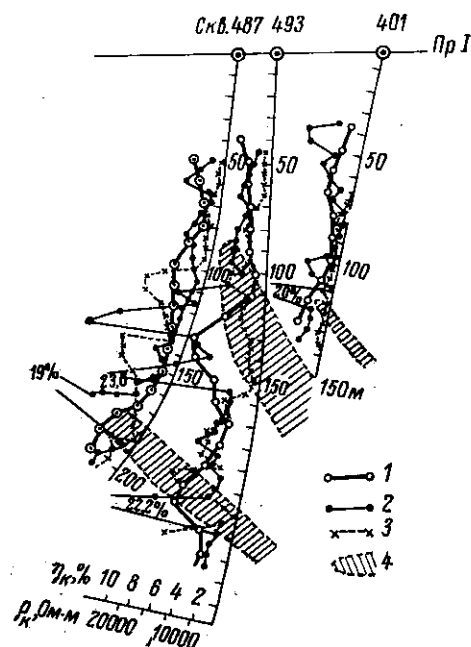


Рис. 166. Результаты скважинных работ на золото-полиметаллическом месторождении в Центральном Казахстане (по В. А. Шафаренко [268]).

Графики: 1 —  $\eta_k$  при заземлении в обсадную трубу исследуемой скважины, 2 —  $\eta_k$ , измеренные с каротажным зондом А5М1N; 3 —  $\rho_k$  для того же зонда; 4 — контуры рудных тел.

оруденением для выявления и прослеживания сульфидных жил и зон гидротермально измененных березитов с сульфидной минерализацией.

В пределах Охотско-Чукотского вулканогенного пояса эпitherмальные золото-серебряные месторождения представлены, как правило, кварцевыми, кварцево-карбонатными, кварцево-полевошпа-

товыми жилами и зонами, залегающими среди липаритов, дацитов, андезитов и их туфов. Размеры жил и зон по простиранию достигают 300—500, иногда 1000 м. Мощность одиночных жил 1—3, жильных зон 80—100 м. По падению они прослеживаются на 300—400 м. Рудные жилы состоят в основном из кварца (до 90%), а также из адюляра и кальцита. Рудные минералы представлены сульфосолями серебра, аргентитом, пираргиритом, электрумом, самородными золотом и серебром. Частицы золота крайне малы, россыпи вблизи таких месторождений отсутствуют.

Объемное содержание сульфидов, в том числе пирита, в рудных жилах не более 1%. Гораздо выше оно в околожильных метасоматитах, распространяющихся от рудных тел на десятки метров. Мощность рыхлых отложений составляет 2—3, иногда 5—7 м. Повсеместно развита многолетняя мерзлота.

Работы методом ВП на таких месторождениях впервые провели в 1975—1977 гг. сотрудники ВИТР под руководством Б. Б. Шатрова. Использовали аппаратуру ВПО-62. Исследования большого количества образцов показали, что поляризуемость рудных жил не превышает 1%. Между тем окорудные измененные породы: игнимбриты, автомагматические брекчии и др., — имеют поляризуемость от 2 до 16%, а неизмененные вулканогенные породы вдали от оруденения характеризуются поляризуемостью, не превышающей 1,5—2%. Для площадной съемки использовали трехэлектродное профилирование с  $AM = 80$  м,  $MN = 40$  м,

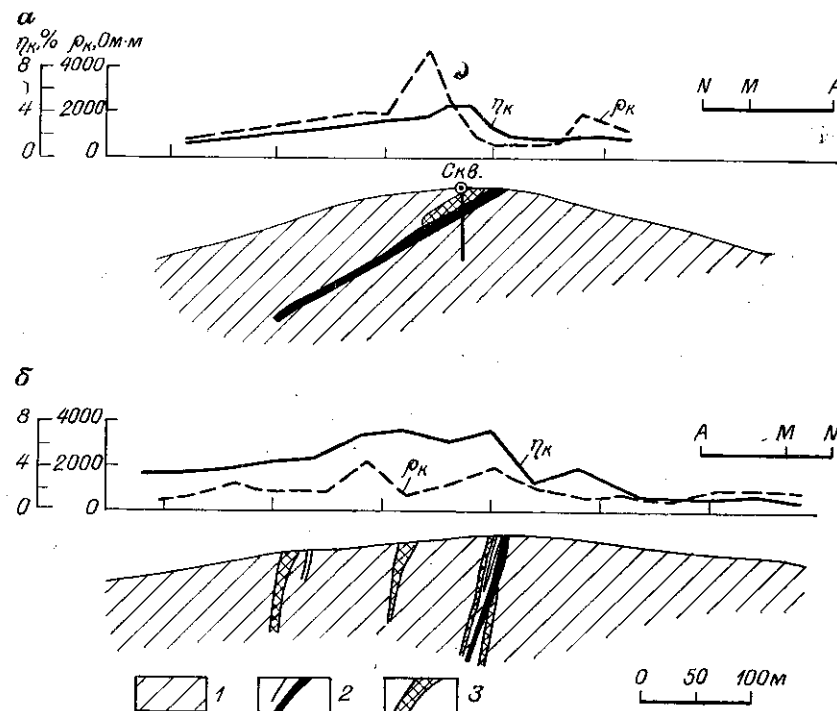


Рис. 167. Графики  $\eta_k$  и  $\rho_k$  трехэлектродного профилирования над пологозалегающей золотоносной жилой (а) и серией крутопадающих жил (б) (по Б. Б. Шатрову).

1 — вулканогенные породы; 2 — рудные тела; 3 — зоны рудного прожилкования.

причем для подчеркивания аномалий токовый электрод стремились расположить от измерительных в направлении восстания рудных жил. Аномалии ВП детализировали с помощью ВЭЗ ВП и, при возможности, скважинных исследований.

На рис. 167 приведены примеры результатов профилирования над рудными жилами с пологим и крутым падением. И в том и в другом случае наблюдаются широкие максимумы  $\eta_k$  (до 7—8 при фоне 1—3%), несколько смещенные от жил в сторону висячего бока. Над жилами или рядом с ними наблюдаются максимумы  $\rho_k$ . По данным площадной съемки прослежены известные рудные зоны и на флангах четырех месторождений выявлены аномальные зоны, коррелирующиеся с литохимическими ореолами золота и ртути. Кроме того, интенсивная аномалия ВП обнаружена над пиритизированными алевролитами и сланцами, примыкающими к рудоносным вулканогенным породам. Буровая проверка одной из перспективных зон подтвердила наличие сульфидов и повышенных содержания золота и серебра.

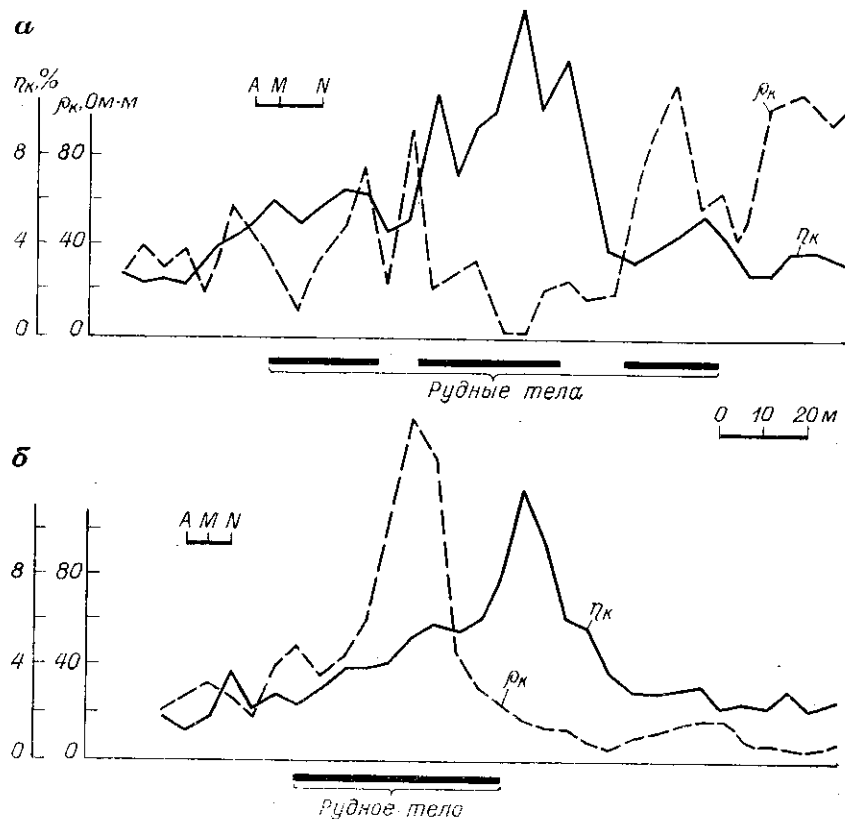


Рис. 168. Графики  $\eta_k$  и  $\rho_k$  трехэлектродного профилирования в штольнях на золоторудном месторождении кварцево-сульфидной формации в Восточном Узбекистане (по И. И. Попову).

Оруденение: а — в зоне дробления; б — в зоне окварцевания.

В Узбекистане детальные исследования на месторождении кварцево-сульфидной формации выполнил И. И. Попов. Месторождение размещается в вулканогенных породах верхнего палеозоя. Золоторудные тела приурочены к кварцевым жилам и зонам окварцевания, которые контролируются субширотными межформационными и субмеридиональными секущими разрывными нарушениями, представленными зонами прожилкового и метасоматического окварцевания с сульфидной минерализацией и золотом. Зоны имеют крутое падение и протяженность до сотен метров при мощности до 50—100 м. Золоторудные тела в них имеют размеры и порядок меньше.

Взаимоотношения рудных тел и аномалий ВП наилучшим образом проявились при измерениях, которые И. И. Попов выполнил в разведочных штольнях с помощью трехэлектродной уста-

новки профилирования А5М10N. Наблюдения в различных выработках показали, что поляризуемость вне рудовмещающих зон составляет 1,5—2,5%, гидротермально измененных пород повышается до 3—3,5, а золотосульфидных тел до 6—12%. Как видно на рис. 168, взаимно коррелируемыми максимумами  $\eta_k$  и минимумами  $\rho_k$  отмечаются рудные тела, находящиеся в дробленых сульфидизированных породах. Интенсивно окварцованным телам соответствуют резкие максимумы  $\rho_k$  и относительно слабые повышения  $\eta_k$ , при этом рядом с золоторудным телом нередко наблюдается значительное увеличение поляризуемости. Такое соотношение  $\eta_k$  и  $\rho_k$ , ярко показанное на рис. 168, б, является, пожалуй, наиболее характерным для месторождений кварцево-сульфидной формации.

## МЕСТОРОЖДЕНИЯ НЕМЕТАЛЛИЧЕСКИХ ПОЛЕЗНЫХ ИСКОПАЕМЫХ

### Графит

Разнообразные процессы метаморфизма пород, содержащих углерод, приводят к образованиям графита, оказывающегося вместе с сульфидами железа одним из самых распространенных электропроводящих минералов в горных породах и иногда в рудах. Графитизация пород — важнейший фактор, который надо учитывать при истолковании аномалий ВП. Региональный динамометаморфизм отмечается огромными по площади и интенсивности ( $\eta_k = 25 \div 30\%$ ) аномалиями ВП. Столь же интенсивные, но линейно-вытянутые аномалии сопутствуют крупным тектоническим зонам смятия. Графитизация во многих случаях усложняет обнаружение рудных тел, но иногда служит главным, а то и единственным косвенным признаком того или другого полезного ископаемого.

Промышленные месторождения графита редки. Вместе с тем они находятся в числе лучших объектов для применения метода ВП. Однако известные месторождения удовлетворяют спрос промышленности, и поиски новых месторождений графита практически не ведутся. Поэтому работы на графитовых месторождениях имеют, как правило, опытно-методический характер. На месторождении Тасказган в Узбекистане в 1969 г. А. А. Смирнов впервые наблюдал положительный потенциал нелинейной ВП, пропуская импульсы постоянного тока через графитовое тело в одном и другом направлении. Несколько позднее на Южном Алтае Я. В. Маркушин и И. С. Чуприн провели аналогичный опыт на графитовом пласте и получили параметр НВП  $\gamma = +7$  м.

На рис. 169 приведены результаты исследований в карьере Завальевского месторождения на юге Украины сотрудниками МГРИ [203]. Рудный пласт мощностью 10 м содержит до 12% графита и залегает среди гнейсов и сланцев. Сланцы содержат вкрапленность графита. Рудная зона перекрыта рыхлыми отложениями мощностью 1—1,5 м.

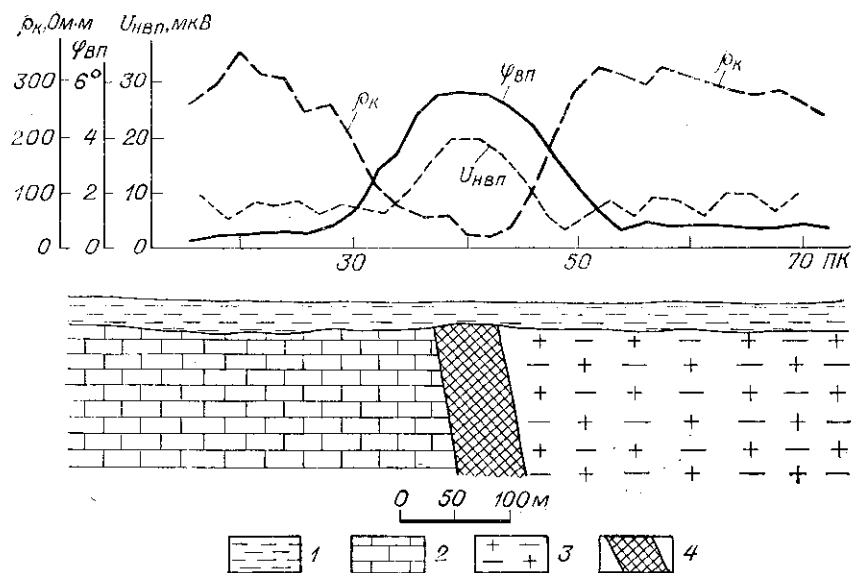


Рис. 169. Графики  $\rho_k$ ,  $\varphi_{вп}$  и  $U_{нвп}$  над графитовым месторождением [203]. 1 — песчано-глинистые отложения; 2 — карбонатные породы; 3 — гнейсы; 4 — рудное тело.

Месторождение образовалось в результате перекристаллизации первичных органических остатков в процессе общего метаморфизма осадочных пород. В состав руды (помимо графита) входят полевой шпат и в меньшем количестве биотит, хлорит, гранат, кальцит и другие минералы.

Измерения  $\rho_k$  и фазового угла ВП  $\varphi_{вп}$  выполнены по схеме срединного градиента с разномом  $AB = 50$  м,  $MN = 4$  м, шагом 2 м. Для получения  $\varphi_{вп}$  использовали двухчастотные измерения на частотах 1,22 и 3,66 Гц. Над графитовым пластом получили максимальные значения  $\varphi_{вп} = -7^\circ$ . Над сланцами фазовый угол ВП снизился до  $-5$ , над гнейсами до  $-2^\circ$ . Кажущееся удельное сопротивление над пластом снизилось до 0,05—0,07, над сланцами составляло 0,5—3 Ом·м.

Потенциал НВП измерили путем сочетания переменного тока частоты 1,22 Гц и импульсов постоянного тока. Электрод  $N$  был неподвижным и находился над гнейсами, электрод  $M$  перемещали по профилю. Потенциал НВП над графитовым телом составил 20 мкВ в расчете на постоянный ток силой 1 А, а параметр НВП  $\gamma = +3,2$  м. Над сланцами потенциал НВП снизился до 1—5 мкВ, а значение  $\gamma$  уменьшилось в 2—10 раз.

Слюда

Работы на слюдяных пегматитах в Северной Карелии провели М. И. Голод и др. [73—75]. Опробование метода ВП в середине 60-х годов, выполненное с аппаратурой ВПО-62, дало несколько неожиданный результат. Пегмати-

товое жили сами не содержат электропроводящих минералов и обладают низкой поляризуемостью (в среднем 1,3%). Однако над пегматитовыми жилами оказались широкие аномалии  $\eta_k$ , иногда осложненные минимумом  $\eta_k$ , непосредственно приуроченным к жиле.

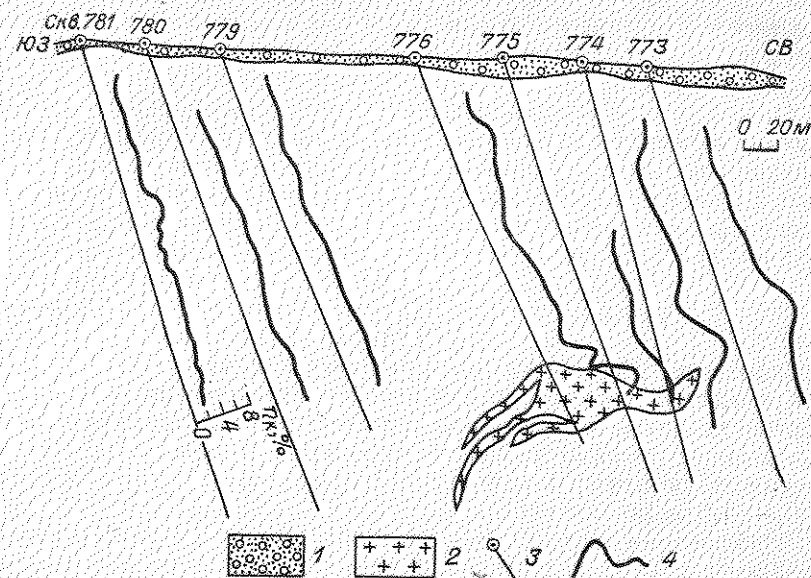


Рис. 170. Графики  $\eta_k$  по скважинам на месторождении слюды в Северной Карелии (по М. И. Голоду). 1 — четвертичные отложения; 2 — пегматитовые жилы; 3 — скважины колонкового бурения; 4 — графики  $\eta_k$ .

товое жили сами не содержат электропроводящих минералов и обладают низкой поляризуемостью (в среднем 1,3%). Однако над пегматитовыми жилами оказались широкие аномалии  $\eta_k$ , иногда осложненные минимумом  $\eta_k$ , непосредственно приуроченным к жиле.

Изучение поляризуемости образцов различных пород, наземные и скважинные исследования позволили установить, что средняя поляризуемость гнейсов, вмещающих пегматиты, выше, чем у пегматитов, и составляет 2,5—2,9%. Наджилыные (по разрезу) проработанные гидротермальными растворами гнейсы содержат вкрапленность пирротина и пирита, их поляризуемость достигает 10% и более. Гнейсы, подстилающие пегматитовую жилу, обладают невысокой поляризуемостью. Мощность зоны, отличающейся высокой поляризуемостью, в 5—10 раз превышает мощность пегматитовой зоны.

В качестве примера на рис. 170 приведены графики  $\eta_k$ , полученные по скважинам при расположении токового электрода на поверхности вблизи устья исследуемой скважины. Полога залегающая пегматитовая жила расположена на глубине 215—230 м. Исследовано семь скважин, из которых три пересекли жилу. Над жилой получены максимумы  $\eta_k$  шириной ~50 м и интенсивностью около 10%. В скв. 773, не пересекающей жилу и отстоящей от нее на 30—40 м в направлении восстания жилы, также наблюдается

заметное повышение  $\eta_k$ . В скв. 779 и 780, находящихся с противоположной стороны от жилы на расстоянии от нее 100—150 м, аномалии  $\eta_k$  нет.

Относительно большая мощность измененных пород, сопровождающих пегматитовые жилы, позволяет обнаруживать перспективные зоны под перекрывающими их рыхлыми отложениями. Кроме того, на результаты метода ВП слабо влияют многочисленные на слюдяных месторождениях обводненные тектонические зоны, затрудняющие истолкование данных метода сопротивлений.

И. И. Попов опробовал метод ВП на месторождении родонита в горах Султануиздаг Западного

Родонит

Узбекистана. Месторождение приурочено к тектонической зоне в кремнистых сланцах, отличающейся интенсивным дроблением, ороговикованием и некоторой пиритизацией. Родонитовые тела, содержащие помимо родонита пиролюзит и родохрозит, имеют линзовидную форму и небольшие размеры: 4—6 по простиранию и 0,5—1,5 м по мощности.

Наблюдения методом ВП, выполненные по схеме срединного градиента в режиме длительной зарядки, показали, что тектоническая зона отчетливо выделяется среди сланцев широкой аномалией  $\eta_k$ , а также понижением  $\rho_k$  (рис. 171). Собственно родонитовое тело отмечается узким локальным минимумом  $\eta_k$  и максимумом  $\rho_k$ . Эти данные свидетельствуют о возможности применения метода ВП для картирования структур, вмещающих родонитовые линзы. При детальной съемке, возможно, удастся выявлять и сами родонитовые тела.

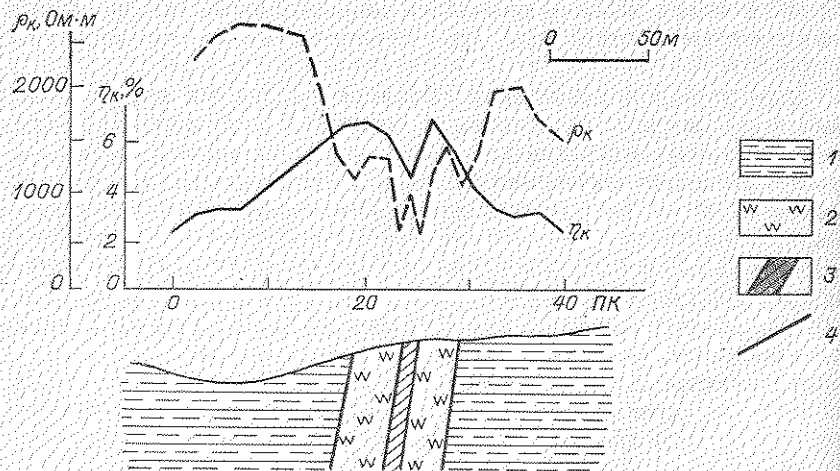


Рис. 171. Графики  $\eta_k$  и  $\rho_k$  срединного градиента над родонитовым месторождением в Западном Узбекистане (по И. И. Попову и А. С. Аюярову).

1 — кремнистые сланцы; 2 — зона ороговикования; 3 — родонитовое тело; 4 — тектонические нарушения.

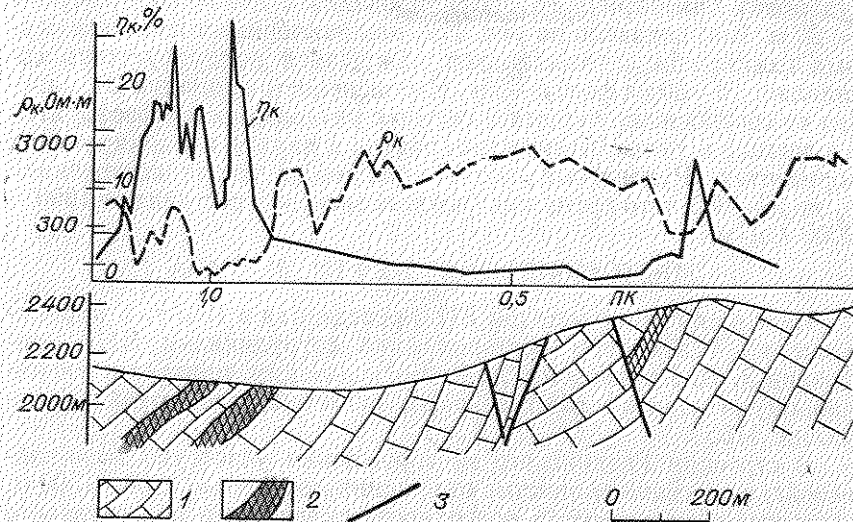


Рис. 172. Графики  $\eta_k$  и  $\rho_k$  симметричного профилирования над фосфоритовым месторождением в Бурятии (по Г. И. Чебакову и П. В. Роксину).

1 — доломиты, известняки, мергели; 2 — черные фосфориты и известняки; 3 — тектонические нарушения.

Корунд

Крупнейшим месторождением корунда, залегающим во вторичных кварцитах, является Семизбугу в Казахстане. Сложные геологические и орографические условия затрудняют здесь применение геофизических методов. Исследования казахстанских специалистов [172] показали, что корундово-андалузитовые и корундово-гематито-андалузитовые руды независимо от их состава сопровождаются вкрапленностью пирита. На этом основании они сделали вывод о перспективности применения метода вызванной поляризации.

Фосфориты

Геофизики Бурятского геологического управления метод ВП применили на Ухагольском месторождении в комплексе с нейтронно-активационной съемкой, магниторазведкой и методом естественного поля для выделения и прослеживания фосфоритоносных горизонтов и сопровождающих их маркирующих горизонтов. Предпосылкой для постановки метода ВП явилась повышенная поляризуемость черных фосфоритов (от 3 до 37%) и подстилающих их тонкоплитчатых черных известняков (2—4%), связанная с наличием в них включений графита и пирита.

Измерения выполнили со станцией «Енисей» в режиме однополярных импульсов с 10-секундной зарядкой\*, использовали

\* Получаемые с этой аппаратурой значения примерно в 2 раза выше, чем с аппаратурой ВПО-62 и другой, использованной в различных примерах.

установку симметричного профилирования с  $AB = 60$  м,  $MN = 20$  м. Как показано на рис. 172, над наклонными пластами черных фосфоритов и известняков кажущаяся поляризуемость составляет 10—30 на фоне 4—5%. Интенсивность аномалий ВП зависит от соотношения черных и светлых разновидностей фосфоритов в пластах, а также количества графита и пирита в маркирующих горизонтах. Рудоносные пласты отмечаются также понижением  $\rho_k$  до 20—300, в то время как фоновые значения составляют 1000—3000 Ом·м.

### МЕСТОРОЖДЕНИЯ НЕФТИ И ГАЗА

Наземная съемка методом ВП, проведенная в 1963 г. в Узбекистане на Газлинском месторождении сотрудниками ВНИИгеофизики З. Д. Кругловой и А. К. Богуславским, привела к неожиданному результату: над газовой залежью оказалась «рудная» аномалия [165].

В строении Газлинского месторождения участвуют мезо-кайнозойские песчано-глинистые отложения мощностью 1200—1500 м, залегающие на размытой поверхности складчатого палеозойского фундамента. Газоносные залежи, приуроченные к меловым породам, в области западного купола имеют минимальную глубину 70 м.

Работы методом ВП выполнены по схеме симметричного вертикального зондирования с  $AB = 3MN$  (установка Веннера) при  $AB = 2-4$  км и профилирования с  $AB = 1$  км,  $MN = 300$  м, использована станция ВП-59, сила тока до 40—50 А,  $t_s = 2$  мин,  $t = 0,5$  с. Измеряемые значения  $\Delta U_{ВП}$ , как правило, превышали 0,5—1 мВ.

По результатам измерений установлено в общем закономерное увеличение  $\eta_k$  по мере приближения к газовым залежам, расположенным на глубине 150—200 м. Максимальные значения  $\eta_k$  достигали 5—7%. Лишь на некоторых участках, где глубина залежей относительно велика, аномалия ВП была нечеткой.

По данным каротажа поляризуемость «пустых» пород меняется от сотых долей до 1,5%, причем обнаруживается тенденция роста ее с глубиной. Поляризуемость газоносных пород в 2—3 раза выше окружающих и составляет 3,0—3,7%.

Примерно тогда же были начаты исследования методом ВП на нефтяном месторождении Кенкияк в юго-восточной части Прикаспийской впадины [76, 164]. Размер соляного массива Кенкияк  $8 \times 3$  км. В надсолевых отложениях скважинами выявлено девять нефтегазовых горизонтов в отложениях мезозоя и верхней перми. Глубина нефтяных залежей от 150 до 600, суммарная мощность нефтяных горизонтов около 100 м. Залежи сводовые, пластовые, стратиграфически и тектонически экранированные.

В. В. Голубков и В. П. Романенко [76] выполнили 65 зондирований установкой Веннера с разносами  $AB = 6-2000$  м. Шаг зондирований обычно составлял 1 км и уменьшался до 500 м при дета-

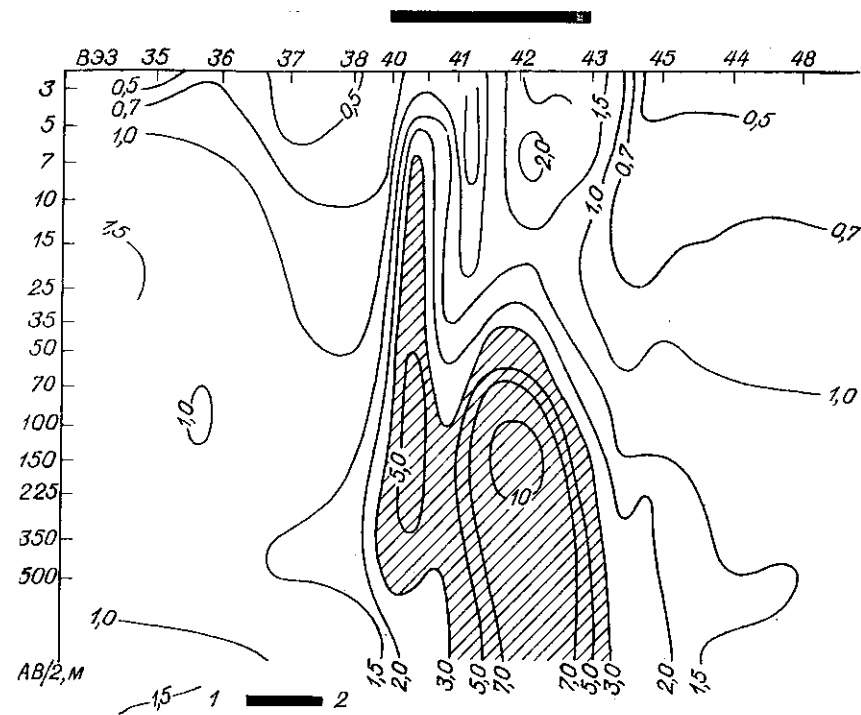


Рис. 173. Вертикальный разрез кажущейся поляризуемости по профилю над нефтяным месторождением Кенкияк (по В. В. Голубкову и В. П. Романенко [76]).

1 — изолинии  $\eta_k$ , %; 2 — проекция внешнего контура второго среднеюрского нефтеносного горизонта на дневную поверхность.

лизации. Построенные вертикальные разрезы кажущейся поляризуемости характеризуются фоновыми значениями  $\eta_k = 0,4-1,5\%$ . Над месторождением получена интенсивная аномалия ВП с двумя максимумами  $\eta_k$ , достигающими 8 и 15% при  $AB = 300$  м. Границы аномальной зоны согласуются с внешним контуром среднеюрского нефтеносного горизонта (рис. 173). Протяженность аномальной зоны ВП составляет 3,5 км. По кривым  $\rho_k$  нефтеносные пласты не выделяются.

На рис. 174 показан построенный З. Д. Кругловой сводный план изолиний  $\eta_k$  для территории, охватывающей соляные купола Кенкияк и Муртуку, а также межкупольное поднятие Кумсай. На Кумсайском поднятии выявлена нефтяная залежь неструктурного типа на глубине около 270 м. Площадь Муртуку по данным глубокого бурения непродуктивна. Высокие значения наблюдаются над месторождениями и отсутствуют над непродуктивной структурой.

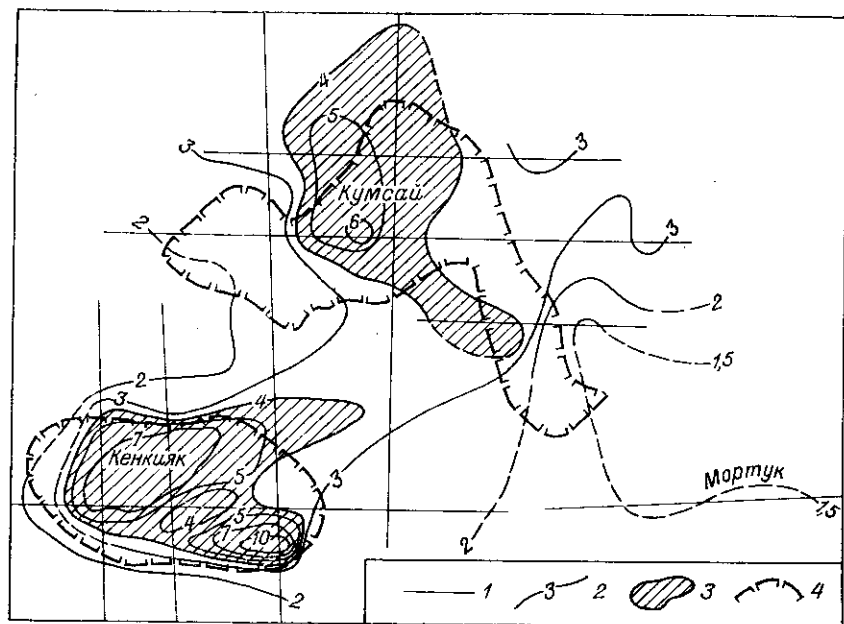


Рис. 174. Сопоставление результатов электроразведки ВЭЗ ВП с данными бурения в районе нефтяных месторождений в Прикаспийской впадине (по З. Д. Кругловой).

1 — профили наблюдений ВЭЗ ВП; 2 — изолинии  $\eta_k$ , %, для  $AB = 1$  км; 3 — зоны аномалий ВП; 4 — контур нефтеносности.

Причину аномалий ВП З. Д. Круглова и др. [163, 164] увидели в ореоле эпигенетической сульфидной вкрапленности над нефтяными залежами, образовавшимися в связи с десульфатизацией газа и миграцией сероводорода. Доводом в пользу такого объяснения служат обнаружения пирита и марказита в сводах нефтегазовых структур. В 1965 г. автор совместно с Ю. Н. Хитаровым изучал поляризуемость образцов пород, взятых с нефтяных месторождений Мангышлака, и обнаружил песчаники с поляризуемостью 15—30%, содержащие мелкую вкрапленность сульфидов железа.

З. Д. Круглова отметила, что аномалии ВП на Кенкияке и Кумсае соединяет полоса повышенных значений  $\eta_k$ ; по современному взгляду геологов, залежи нефти на Кенкияке образовались в результате вертикальной миграции углеводородов из подсолевых отложений. Кумсайская залежь сформировалась за счет частичного перетока нефти с Кенкиякской площади после заполнения там ловушек. Вторичная сульфидная минерализация возникла в среде, имевшей восстановительные свойства во время миграции через нее нефти.

А. В. Куликов для работ в нефтегазоносных районах Приморья, Гурьевской области, Северного Усть-Урта и Северного Кавказа использовал аппаратуру ИНФАЗ-ВП [286]. Фазовые измерения выполнены на частотах от 0,04 до 312 Гц, разнос  $AB = 500 \div 4000$ ,  $MN = 50 \div 400$  м. Для уменьшения индукционных эффектов использовали ортогональную установку, в которой измерительная линия перпендикулярна к проводу токовой. Получены аномалии ВП над нефтяными и газовыми залежами, находящимися на глубине до 1,5 км.

## ГИДРОГЕОЛОГИЧЕСКИЕ И ИНЖЕНЕРНО-ГЕОЛОГИЧЕСКИЕ ИССЛЕДОВАНИЯ

Еще в начале 30-х годов К. Шлюмберже и его сотрудники делали попытки привлечения метода ВП к решению задач каротажа скважин в осадочных породах [316]. Несколько позднее А. С. Семенов, усовершенствовав методику измерений поляризуемости, организовал исследования ВП песчано-глинистых пород и, в частности, установил, что поляризуемость таких пород примерно пропорциональна их удельному сопротивлению [254, 257]. В послевоенные годы исследования ВП осадочных пород получили дальнейшее развитие благодаря работам В. Н. Дахнова и его учеников в области промысловой геофизики [83—86, 89, 174—177] и работ кафедры геофизических методов МГУ в области гидрогеологии [168—170]. В настоящее время ведущую роль приобретают работы Всесоюзного научно-исследовательского института гидрогеологии и инженерной геологии (ВСЕГИНГЕО) [240, 241, 244, 308, 309] и Центрального научно-исследовательского института по инженерным изысканиям в строительстве (ЦНИИС) [178].

А. Э. Липская и В. А. Ряполова исследовали поляризуемость разнообразных осадочных пород в условиях длительной зарядки в интервале времени спада от 0,5 до 5 с и более, регистрируемом с помощью аппаратуры ВП-62, ВПС-63 и т. п. Они нашли, что поляризуемость обломочных пород определяется главным образом строением порового пространства. Чем больше различаются по поперечному сечению отдельные поровые каналы породы, тем больше их поляризуемость. Породы, однородные по фракционному составу, типа хорошо сортированных песков, жирных глин, пылеватых суглинков, имеют наименьшую поляризуемость. Напротив, породы с примесью фракций, резко отличающихся от основной массы частиц: супеси, легкие суглинки, пески с включениями глинистого материала — обладают относительно высокой поляризуемостью.

Увеличение солёности влаги, содержащейся в порах породы, приводит к резкому уменьшению поляризуемости. При минерализации влаги свыше 10 г/л ВП практически отсутствует. Поляризуемость существенно зависит от влажности и достигает максимальных значений при влажности породы 3—5%. При

большой влажности решающее значение имеют состав и текстура породы.

По данным А. Э. Липской и В. А. Ряполовой [178], высокие значения  $\eta_k$  соответствуют породам, которые по инженерно-геологической классификации располагаются в интервале от мелких песков до легких суглинков. Максимальной поляризуемостью обладают тяжелые супеси и легкие суглинки. Низкие значения  $\eta_k$  типичны, с одной стороны, для водонасыщенных крупнообломочных пород, с другой — для однородных глинистых грунтов. Минимальной поляризуемостью обладают пылеватые суглинки и жирные глины.

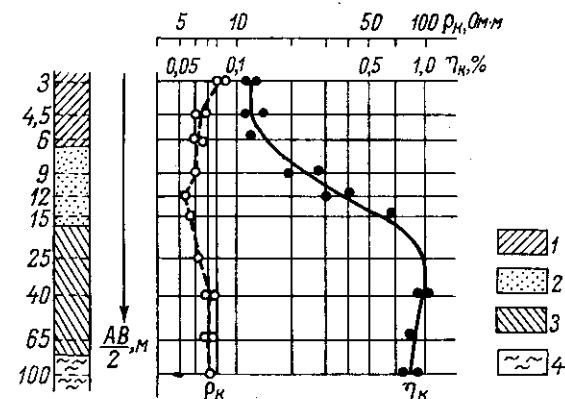
Скорость спада ВП у песчаных грунтов обусловлена их гранулометрическим составом и уменьшается с увеличением диаметра преобладающей фракции. Кроме того, у водоносных песков скорость спада ВП меньше, чем у маловлажных. У глинистых грунтов скорость спада меняется в больших пределах, чем у песчаных, и нередко коррелируется с изменением поляризуемости: чем больше поляризуемость, тем меньше скорость спада.

Среди карбонатных пород известняки и доломиты имеют более высокую поляризуемость и низкую скорость спада, чем мергели. Поляризуемость песчано-глинистых пород относительно больше, если частицы глины обволакивают песчинки, а не находятся в стыках между ними [159, 218, 395]. Кроме того, поляризуемость зависит от объемного соотношения песчаных и глинистых частиц, а также от состава последних. Л. Андерсон и Дж. Келлер [330] установили, что максимальная поляризуемость соответствует содержанию монтмориллонита, равному 0,1—0,4% объема породы. Для каолина, имеющего большую емкость ионного обмена, оптимальное содержание составляет 3—12%. Те же закономерности получила Э. Н. Кузьмина [169]. Одновременно она уточнила роль влажности. В опытах с песком, содержащим 5% монтмориллонита, максимум поляризуемости получен при влажности 10—19%. С ростом солёности воды количество глины, соответствующее максимальной поляризуемости, возрастает. Теоретическое объяснение и экспериментальное подтверждение указанных особенностей ВП песчано-глинистых пород дали сотрудники Института геофизики Уральского научного центра АН СССР [108, 159].

Применение метода ВП, в котором сведения о поляризуемости сочетаются с измерением  $\rho_k$  и изучением временных особенностей ВП, обеспечивает повышение разрешающей способности при изучении песчано-глинистых пород по сравнению с методом сопротивления. В качестве примера на рис. 175 приведены графики  $\eta_k$  и  $\rho_k$  вертикального зондирования, выполненного в 1955 г. на Алтае [143]. Песчано-глинистые мезо-кайнозойские отложения характеризуются устойчивыми значениями удельного сопротивления,  $\rho_k = 5,5 \div 8$  Ом·м. Залегающий среди глин водоносный горизонт тонкозернистых песков отмечается возрастанием  $\eta_k$  от 0,1—0,2

Рис. 175. Графики  $\eta_k$  и  $\rho_k$  вертикального зондирования над водоносным горизонтом на Алтае.

1 — глины плотные желтые; 2 — пески тонкозернистые; 3 — глины плотные коричневые; 4 — глины пестроцветные.



при малых разностях  $AB$  до 0,8—1% при больших разностях, соответствующих глубине залегания песков.

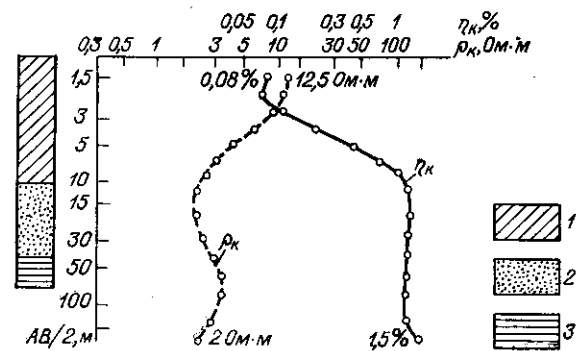
Анализ значительного фактического материала привел сотрудников ВСЕГИНГЕО к выводу, что в сложных геоэлектрических разрезах песчаных и гравийно-галечных пород уровень подземных вод удается определять лишь с помощью метода ВП [308, 309]. Уровень грунтовых вод примерно равен полуразносу токовых электродов, соответствующему максимуму  $\eta_k$  вертикального зондирования (рис. 176).

Н. Н. Шарапанов и Г. Я. Черняк [308], ссылаясь на опыт изучения Азовского кристаллического массива, рекомендовали метод ВП для поисков зон повышенной трещиноватости скальных пород. При этом интерпретационным параметром служит отношение  $\eta_k/\rho_k$ , значение которого у трещиноватых пород на порядок выше, чем у ненарушенных кристаллических пород.

Метод ВП можно применять на различных стадиях разведки подземных вод при глубине их залегания до 100 м с тем, чтобы в комплексе с другими методами литологически расчленять разрез, оценивать фильтрационные свойства пород и минерализацию под-

Рис. 176. Графики  $\eta_k$  и  $\rho_k$  вертикального зондирования над водоносным горизонтом в Саратовской области (по Н. Н. Шарапанову и Г. Я. Черняку [308]).

1 — суглинки; 2 — пески; 3 — глины.



земных вод, а также решать задачи, связанные с мелиорацией земель [309].

А. Д. Жигалин [97] отметил, что оползневые отложения отличаются от покровных делювиально-элювиальных суглинков и от коренных пород увеличением в 3—4 раза удельного сопротивления и в 3—5 раз поляризуемости. Зондирования методом ВП целесообразны для детального изучения оползневых тел.

Работы американских геофизиков в 50-х годах [218, 395] в немалой степени способствовали развитию гидрогеологического направления метода ВП. Имеются публикации об успешном применении метода ВП [335, 336, 339, 413], однако за рубежом он не приобрел производственного значения, как в СССР.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Развитие геофизических методов поисков и разведки месторождений полезных ископаемых идет по двум направлениям. С одной стороны, совершенствуются техника измерений и методика истолкования физических параметров, уже ставших традиционными, с другой — появляются методы, основанные на использовании новых параметров и дающие принципиально иную информацию о физических или физико-химических свойствах горных пород.

Использование поляризуемости пород, вызываемой воздействием электрического тока, значительно расширило возможности электроразведки и позволило решить ряд задач, доставлявших ранее геофизикам-разведчикам известные затруднения:

- 1) определять тип проводимости «аномальных» объектов и, выделяя среди них электропроводящие, существенно приблизиться к прямому выявлению сульфидных рудных месторождений;
- 2) выявлять рассеянные вкрапленные руды, представленные электропроводящими минералами;
- 3) обнаруживать глубокие «слепые» рудные тела путем регистрации окружающих их ореолов бедной рудной минерализации.

Поиски и разведка рудных месторождений осуществляются комплексом геологических, геохимических и геофизических методов, в котором метод ВП занял видное место. Совершенствование аппаратуры и методики работ приводит к повышению производительности труда, портативности и помехоустойчивости аппаратуры, и вместе с тем к увеличению популярности метода ВП и фронта его геологического применения.

В методе ВП изучается вторичное электрическое поле, порожденное взаимодействием электрического тока с геологической средой и несущее в себе непосредственную информацию о свойствах тел — источниках вторичного поля.

Исследования временных характеристик ВП в широком диапазоне времени — от 100 мкс до десятков минут — дало экспериментальные сведения о том, какими собственными временными пара-

метрами обладают геологические тела. Появились практические приемы распознавания тел по временным характеристикам вторичного электрического поля, а также теоретические объяснения наблюдаемых закономерностей. Открылся путь довольно тонкого исследования размеров и текстуры электропроводящих включений, приводящего к разделению, например, рассеянной мелкой вкрапленности, характерной для пиритизированных и графитизированных пород, и прожилково-вкрапленных руд. Заманчивые перспективы дает изучение временных характеристик ВП осадочных пород, структура и состав заполнения порового пространства в которых особенно сильно влияют на раннюю стадию ВП.

Электрохимические процессы, в сущности, нелинейны. При больших плотностях возбуждающего тока э. д. с. поляризации не пропорциональна току, а форма токовой зависимости определяется видом электрохимической реакции и соответственно составом реагирующих веществ. Возможности решения обратной задачи, т. е. определения состава электропроводящих тел по наблюдениям вольт-амперных характеристик, показывают работы группы сотрудников ВИТР, возглавляемой Ю. С. Рыссом [243].

Глубокое изучение процессов ВП дало уверенность, что нелинейные эффекты можно регистрировать и при малых плотностях тока, реализуемых в обычной обстановке работ методом ВП. Накоплены лабораторные и полевые факты о различии анодной и катодной поляризации минералов. Создана технико-методическая база метода НВП и получены материалы, свидетельствующие о доступности, прежде всего, разделения по НВП сульфидов и графита, а также в скором времени полиметаллического и медноколчеданного оруденения. Дальнейшее развитие метода НВП, уже сейчас имеющего несколько вариантов, должно дать возможность более детальной оценки минерального состава рудных зон. Конечной целью разработки геофизических методов служит создание средств не только обнаружения «аномалиеобразующих» объектов, но и определения их состава.

Дополнительную перспективу дает начатое канадским геофизиком Г. Сигелом изучение магнитного поля вторичных токов ВП [407]. Создание соответствующих высокочувствительных и малоинерционных магнитометров избавляет от необходимости иметь заземленную измерительную линию, а значит, не исключает аэроварианта метода ВП. Измерения магнитного поля предпочтительны в хорошо проводящих средах, когда токи ВП велики, но измеряемая в обычном варианте метода ВП напряженность вторичного электрического поля мала.

Сочетание электрических и магнитных измерений ВП дает путь к оценке магнитных свойств поляризуемых тел, представляющей в ряде случаев значительный практический интерес.