

МИНИСТЕРСТВО ВЫСШЕГО И СРЕДНЕГО СПЕЦИАЛЬНОГО  
ОБРАЗОВАНИЯ РСФСР  
МОСКОВСКИЙ ОРДЕНА ТРУДОВОГО КРАСНОГО ЗНАМЕНИ  
ГЕОЛОГОРАЗВЕДОЧНЫЙ ИНСТИТУТ  
имени СЕРГО ОРДЖОНИКИДЗЕ

---

ПРИМЕНЕНИЕ МЕТОДА ВЫЗВАННОЙ ПОЛЯРИЗАЦИИ  
ПРИ ПОИСКАХ МЕСТОРОЖДЕНИЙ ПОЛЕЗНЫХ ИСКОПАЕМЫХ

Межвузовский научный сборник

Москва 1987

СО Д Е Р Ж А Н И Е

	<i>Стр.</i>
Предисловие .....	5
Рыжов А.А. Основные закономерности вызванной поляризации горных пород .....	7
Хлопонина Л.С. Некоторые приемы интерпретации точечных зондирований .....	24
Сушкевич Н.В. Использование временных характеристик дифференциальной поляризуемости при изучении горизонтально-слоистых разрезов .....	42
Шувал-Сергеев А.Н. О тензорных параметрах вызванной поляризации .....	56
Якубовский Ю.В., Червяченко В.Р. Об одном способе измерений в методе вызванной поляризации .....	65
Попов В.А., Сушкевич В.В., Бобровников Л.З. Цифровая многоканальная аппаратура метода вызванной поляризации..	75
Комаров В.А., Березин Г.И., Духнин К.Ю., Использование временных особенностей дифференциальной поляризуемости при поисках кимберлитовых тел .....	93
Петров А.В., Попов И.И. Временные характеристики ВП на рудных объектах в Узбекистане .....	100
Гребенщиков Д.С., Карасев А.П., Ланда В.Е., Белов Е.П., Топорков В.Е., Мальцев П.Н. Возможности метода РС ВП при детальном поисках сульфидного оруденения в древних метаморфических породах .....	110
Шевнин В.А., Модин И.Н., Дубова И.Ю., Мельникова С.М. Использование метода ВП в комплексе поисковых исследований на рудоперспективных участках .....	120
Шарапанов Н.Н. Метод вызванной поляризации с использованием многоканальной аппаратуры при решении задач гидрогеологии и инженерной геологии .....	131
Закрякин В.К. Применение метода ВЭЗ-ВП при гидрогеологических и инженерно-геологических исследованиях речных долин Центрального Казахстана .....	139
Хмелевской В.К., Галин Д.Л., Моргун И.П. О геолого-гидрогеологическом истолковании ВЭЗ-ВП .....	151

УДК 550.837.8

В.А. Шевнин, И.Н. Модин, И.Ю. Дубова, С.М. Мельникова

### ИСПОЛЬЗОВАНИЕ МЕТОДА ВП В КОМПЛЕКСЕ ПОИСКОВЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ НА РУДОПЕРСПЕКТИВНЫХ УЧАСТКАХ

Повышение эффективности метода вызванной поляризации (ВП) возможно не только на пути совершенствования аппаратуры и методики наблюдений, но и комплексной обработки данных ВП. Именно эта сторона вопроса служила объектом исследований возможностей статистической обработки данных ВП в комплексе с другими методами, проводимых на кафедре геофизики МГУ с 1975 г. Эти исследования показали, что во многих случаях рудные объекты, представляющие промышленный интерес, фиксируются слабыми аномалиями ВП [1]. Для их выделения необходимо использовать статистические методы и принципы совместной обработки данных ВП в комплексе с другими геофизическими методами [2]. Так как статистические методы чувствительны к виду закона распределения, то были выполнены проверки экспериментальных данных на совпадение с тем или иным законом распределения, которые показали, что фоновые значения  $\eta_k$  и  $\rho_k$  подчиняются логнормальному закону [1,3]. Между фоновыми значениями  $\eta_k$  и  $\rho_k$  существует устойчивая положительная корреляционная связь, которая, в частности, для многих районов Центрального Казахстана может быть выражена уравнением  $\eta_k = 0,2 \rho_k^{0,35}$  [1]. Так как фоновые и аномальные значения  $\eta_k$  зависят от  $\rho_k$ , то при сопротивлении среды в 20-30 Ом·м значения  $\eta_k$  в 1-1,5% являются аномальными по правилу "трех сигм", а при  $\rho$  среды в 25-30 тысяч Ом·м значения  $\eta_k$  в 7-10% могут быть фоновыми. Эти закономерности при их использовании в других районах, вероятно, потребуют дополнительного изучения корреляции фоновых значений ВП.

Важными задачами рудной геофизики являются разделение территории на перспективные и неперспективные участки /качественная задача прогнозирования/ и в благоприятных условиях оценка содержания полевных ископаемых на перспективных участках /количественная задача прогнозирования/. В обеих этих задачах существенную роль может играть метод ВП. Ниже на отдельных примерах показаны возможности решения этих задач.

На одном из участков в Магаданской области, перспективном на рассеянное редкометальное оруденение, ставилась задача локализации перспективной площади по геофизическим данным. В масштабе 1:10000 на всю площадь участка имелись карты  $\zeta_k$ ,  $\rho_k$  и  $\Delta T$ . Для решения задачи использовался метод распознавания образов с обучением на эталонах. В пределах участка для обучения были выделены две площади: заведомо перспективная и бесперспективная, называемые далее для краткости площадками "Да" и "Нет". По выборкам геофизических полей на площадках обучения прежде всего было проверено соответствие данных законам распределения. Для этого были рассчитаны и построены гистограммы и графики накопленных частот при разбиении на равные интервалы в арифметическом и логарифмическом масштабе. Как и предполагалось, значения  $\zeta_k$  и  $\rho_k$  соответствовали логнормальному и  $\Delta T$  - нормальному закону распределения, что учитывалось при дальнейшей обработке. Для каждого из трех параметров вычислялась вероятность разделения гистограмм геофизических признаков  $\delta$  для площадок "Да" и "Нет" по формуле:

$$\delta = 1 - q,$$

где  $q = S_{пер} / (S_1 + S_2) [2]$ ;  $S_1$  и  $S_2$  - площади под гистограммами;  $S_{пер}$  - площадь пересечения гистограмм.

Наибольшая вероятность разделения гистограмм установлена по  $\rho_k$  (82%), меньше по  $\zeta_k$  (75%), при отсутствии разделения по  $\Delta T$  (53%) /рис. 1/. Поэтому далее анализировались лишь карты  $\rho_k$  и  $\zeta_k$ . Для большей наглядности, данные ВП были изображены на кроссплоте /точечной диаграмме/  $\zeta_k - \rho_k$  с логарифмическим масштабом по обеим осям /рис. 2/, где точки для площадок "Да" и "Нет" обозначены по разному. Средние значения для площадки "Да" - 1150 Ом·м для  $\rho_k$  и 2% для  $\zeta_k$ , для площадки "Нет" - 430 Ом·м и 2,9% соответственно. Повышенные значения  $\rho_k$  и пониженные  $\zeta_k$  в пределах рудного участка связаны с широким развитием кварцевых жил на его площади. Таким образом, в масштабе 1:10000 наиболее характерным поисковым признаком рудоносности оказывается окварцевание.

Для использования результатов обучения на эталонных участках для разделения всей площади на перспективную и неперспективную на точечной диаграмме /см. рис. 2/ была проведена линия раздела полей точек, относящихся к площадкам "Да" и "Нет". Ее уравнение  $\rho_k = c \cdot \zeta_k^{0.66}$ . Коэффициент  $c$  носит название дискриминантной метки. Значение

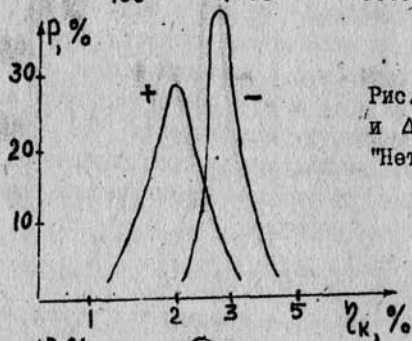
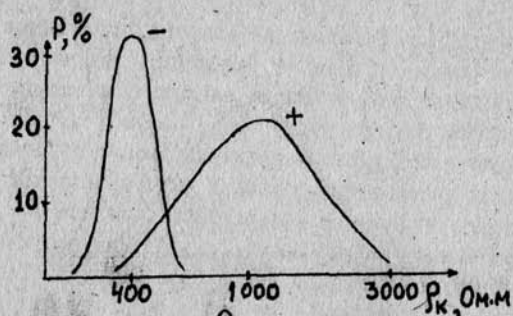


Рис. 1. Гистограммы  $\rho_k, \zeta_k$  и  $\Delta T$  для участков "Да" (1) "Нет" (2)

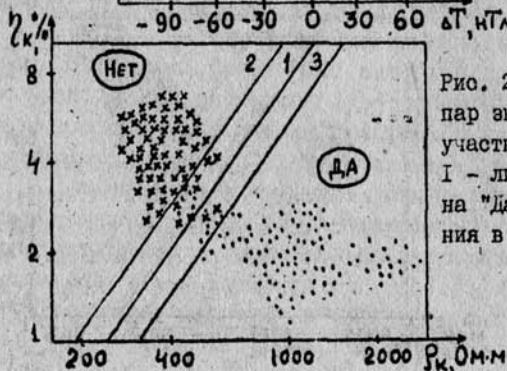
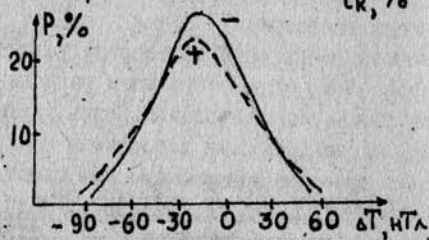


Рис. 2. Точечная диаграмма пар значений  $\rho_k$  и  $\zeta_k$  для участков "Да" (•) и "Нет" (x): 1 - линия разделения участков на "Да" и "Нет"; 2,3 - пояснения в тексте

$\sigma = 240$ , соответствующее линии I на рис. 2, можно принять за пороговое. По любой паре значений  $\eta_k$  и  $\rho_k$  для произвольной  $L$ -й точки участка можно рассчитать  $\sigma_i = \rho_{xi} / \eta_{xi}^{0.66}$  и, если полученное значение  $\sigma_i$  меньше 240, то точка считается рудной, а если больше 240, то - безрудной. Так как вблизи границы I отмечается некоторое пересечение областей "Да" и "Нет", то можно ввести границы области неопределенных решений. На рис. 2 они показаны линиями 2 и 3. При значениях  $\sigma_i$  больше 320 точка относится к классу "Да", а при  $\sigma_i < 194$  - к классу "Нет", промежуточные значения  $\sigma_i$  дают область отказа от классификации.

Вместо расчета дискриминантной метки можно применить более простой графический способ решения. Из рис. 2 видно, что площадке "Да" соответствуют значения  $\rho_k > 500$  Ом.м и  $\eta_k < 3\%$ . Если на картах  $\eta_k$  и  $\rho_k$  выделить площади, удовлетворяющие обоим условиям одновременно, то это и будет перспективная площадь. Результаты такого графического разделения показаны на рис. 3. Отношение перспективной площади к общей площади участка или локальность графического прогноза составило 22%.

На перспективной площади в масштабе 1:2000 были поставлены детализационные работы методами ВП и магниторазведки и проведено металлотометрическое опробование. По этим данным авторами была сделана попытка прогноза концентраций рассеянного рудного вещества по геофизическим полям. Для этого использовался пакет программ обработки комплекса данных на ЭВМ, выполняющий следующие операции: расчет гистограмм и накопленных частот для проверки закона распределения геофизических и геохимических признаков, логарифмирование параметров в случае совпадения их с логнормальным законом, вычисление дополнительных признаков в скользящем по профилю окне: средних, дисперсий, парных коэффициентов корреляции, перегруппировка признаков для выполнения множественной линейной регрессии (MLP), расчет матрицы парных коэффициентов корреляции, коэффициента множественной корреляции и коэффициентов регрессии. Программы были составлены с использованием пакета подпрограмм SSP[4].

Поточечный прогноз множественного коэффициента корреляции геофизических полей с содержанием полезного ископаемого, проведенный вдоль линии профиля, проходящего вкrest рудоносной зоны, дал коэффициент множественной корреляции 0,17 без учета закона распределе-

ния и 0,24 после логарифмирования признаков  $\zeta_k$ ,  $\rho_k$  и содержания металла С, подчиняющихся логнормальному закону. Более заметное улучшение тесноты корреляционной связи дал переход от поточечного прогноза к интервальному, в пределах скользящего окна, ориентированного перпендикулярно профилю, но параллельно простиранию рудной зоны. С увеличением ширины окна осреднения с 3 до 11 точек происходил быстрый рост коэффициента множественной корреляции с 0,2 до 0,75. Для корреляции с С здесь взяты  $\zeta_k$ ,  $\rho_k$  и  $\Delta T$  /рис. 4/. При дальнейшем увеличении ширины окна наблюдается уменьшение скорости роста к МДР. Поэтому интервал осреднения в 11 точек можно считать оптимальным для данных условий. Реальная величина интервала - 100 м.

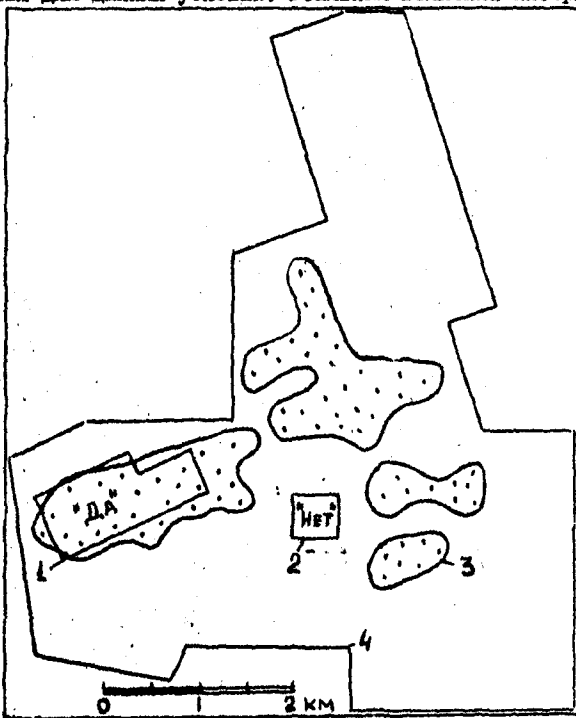


Рис. 3. Результаты дискриминантного анализа по полям  $\rho_k$  и  $\zeta_k$ :  
1 - впадный участок "Да"; 2 - впадный участок "Нет"; 3 - перспективные участки

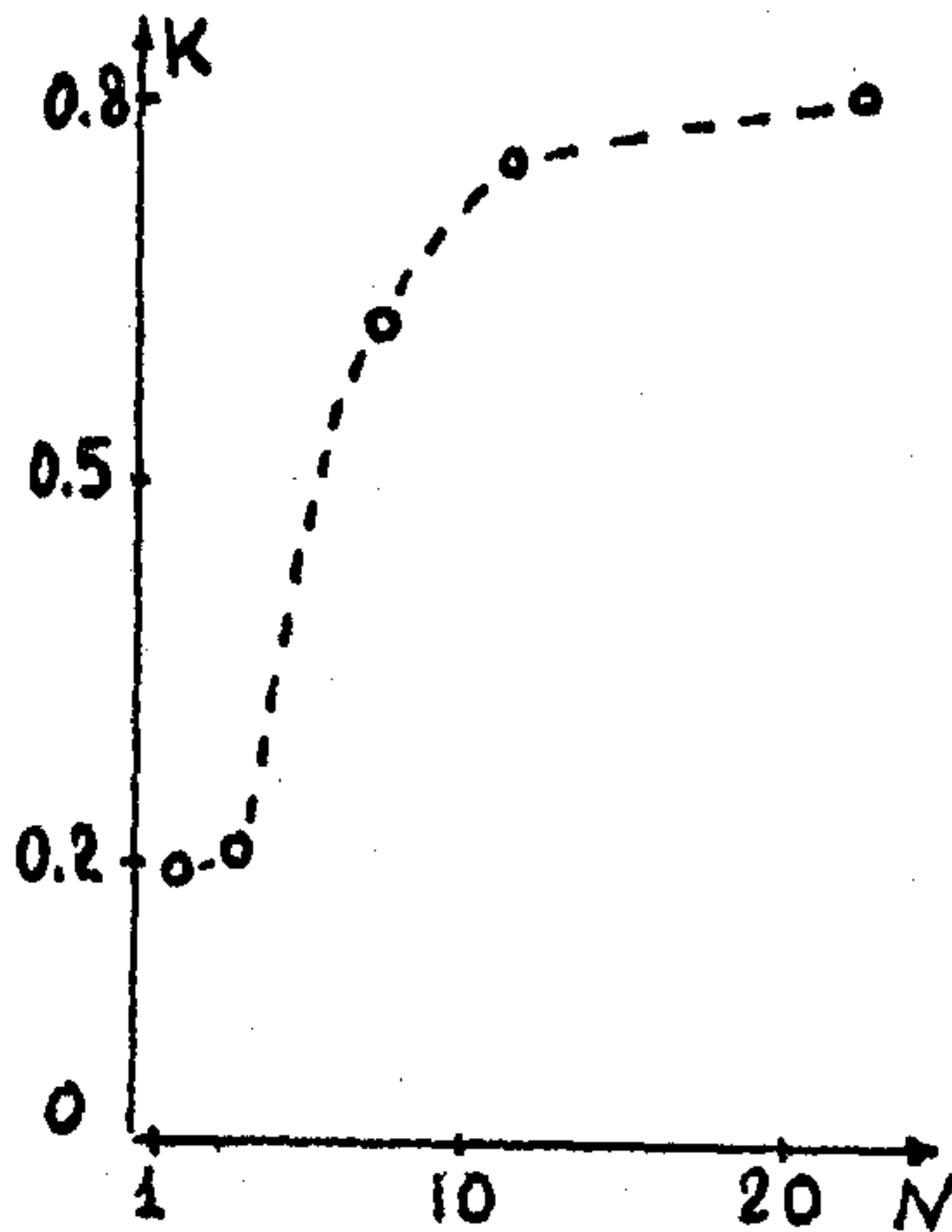


Рис. 4. Зависимость коэффициента множественной корреляции от величины интервала осреднения

На следующем этапе был проведен выбор наиболее информативных признаков. С этой целью была рассчитана матрица парных коэффициентов корреляции /рис. 5/, по которой прежде всего выявлялись признаки имеющие наибольшие коэффициенты парной корреляции с содержанием металла С. Из совокупности признаков в порядке убывания информативности выбраны:  $K_{\eta T}$ ,  $\Delta T$ ,  $\bar{\eta}_K$ ,  $S_T$ ,  $S_{\eta}$ ,  $K_{\eta p}$ ,  $K_{pT}$ , представленные в виде корреляционной матрицы на рис. 5. Обозначения:  $K_{\eta T}$  - коэффициент парной корреляции  $\eta_K$  и  $\Delta T$ ,  $S$  - стандарт признака,  $\bar{\eta}_K$  - среднее значение признака.

$\Delta T$	$\bar{\eta}_K$	$S_T$	$S_{\eta}$	$K_{p\eta}$	$K_{T\eta}$	$K_{pT}$	С	
1	-0.63	0.90	-0.5	0.52	0.6	0.12	-0.7	$\Delta T$
	1	-0.6	0.31	-0.7	-0.3	-0.2	0.61	$\bar{\eta}_K$
		1	-0.2	0.5	0.5	0.1	-0.58	$S_T$
			1	-0.3	0.02	-0.3	0.5	$S_{\eta}$
				1	0.2	0.1	-0.46	$K_{p\eta}$
					1	0.1	-0.74	$K_{T\eta}$
						1	-0.35	$K_{pT}$
							1	С

Рис. 5. Матрица парных коэффициентов корреляции



Для прогноза было решено ограничиться тремя признаками имеющими наиболее высокие коэффициенты парной корреляции с  $C$ :  $K_{\gamma T}$ ,  $\Delta T$ ,  $\gamma_k$ . В этом случае коэффициент множественной корреляции составил  $0,9 \pm 0,06$ . Таким образом, по данным магниторазведки и ВП удалось получить достаточно надежный прогноз концентрации рассеянного рудного вещества, но не точечный, а интервальный. Геофизические признаки изменяются по линии исследования вкост рудной зоны закономерно. Металлоносность зоны генетически связана с гидротермально-метасоматическим преобразованием вмещающих пород.

Интересно отметить, что в масштабе 1:10000 рудоперспективные площади отмечаются повышенными значениями  $R_k$  и пониженными  $\gamma_k$  за счет процесса окварцевания, а в масштабе 1:2000 метасоматические изменения пород дают повышенные значения  $\gamma_k$  /коэффициент парной корреляции  $C$  с  $\gamma_k$   $+0,6/$ , причем в метасоматитах и в рудных жилах возрастает неравномерность в распределении сульфидов ( $K_{\gamma-C} = +0,5$ ). Естественно, что объединенная реакция на процесс метасоматоза магнитного поля и кажущейся поляризуемости, выражаемая коэффициентом корреляции  $K_{\gamma T}$  с металлоносностью рудных зон оказывается более сильной, чем у  $\gamma_k$  и  $\Delta T$  в отдельности и достигает 0,74. Этот факт хорошо известен в рудной геофизике [5]. Закономерно ведет себя и коэффициент корреляции  $K_{\gamma C}$  /его корреляция с  $C = -0,46/$ . Если в фоновой области  $K_{\gamma C}$  слабо положителен ( $0,1 + 0,4$ ) [1], то в аномальной зоне он становится отрицательным ( $-0,2 + -0,5$ ). Графики изменения перечисленных информативных признаков над рудной зоной показаны на рис. 6.

Весьма актуальной задачей в данном районе является прогноз содержания рассеянного рудного вещества по простиранию рудных жил. Такие жилы при ширине в первые метры или десятки метров прослеживаются на километры по простиранию. На одном из участков сосредоточения рудоносных жил, приуроченных к зонам гидротермально метасоматических изменений пород и связанных с мелкими интрузиями андезитового состава исследовалась возможность прогноза рудных скоплений по простиранию жил. Для анализа были использованы геофизические карты  $R_k$ ,  $\gamma_k$  и  $\Delta Z$  масштаба 1:2000. Основная трудность изучения данного участка состояла в малых по площади масштабах проявления оруденения, в результате чего прогноз пришлось вести по малому количеству точек.

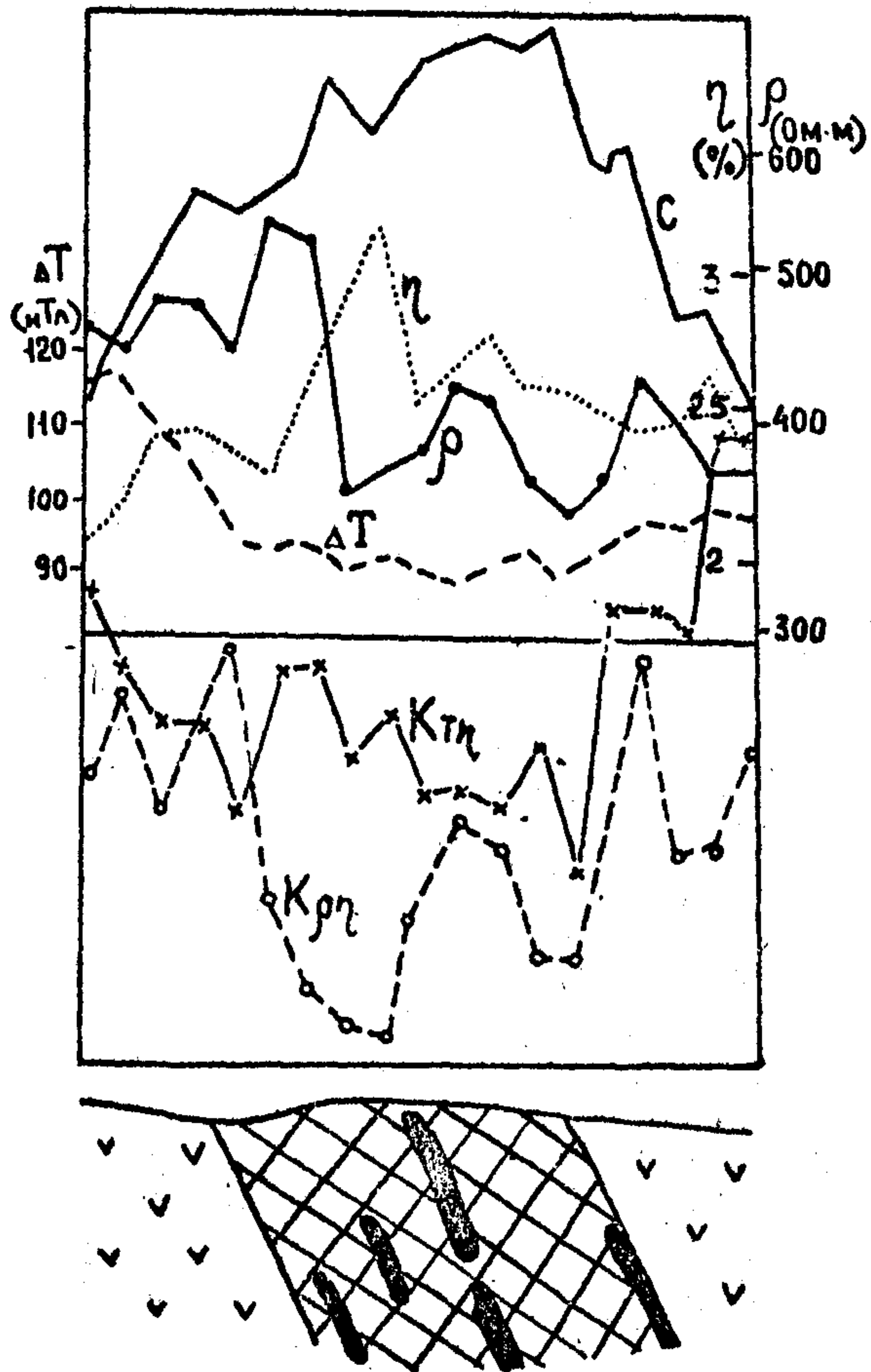


Рис. 6. Графики изменения информационных признаков над рудной зоной

Одна из рудоносных жил была взята в качестве объекта обучения. Ее заведомо рудные и безрудные части, выявленные по результатам опробования, использовались как эталоны "Да" и "Нет". По профилю, проходящему вдоль жилы, по значениям трех исходных полей о исполь-

зованием окользящего окна были рассчитаны 12 дополнительных признаков. Признаки: средние, стандарты  $\eta_k$ ,  $\rho_k$  и  $\Delta Z$  и коэффициенты парной корреляции и регрессии. Ширина окна была выбрана равной 15 точкам. Для каждого признака оценивалась надежность разделения гистограмм для эталонов "Да" и "Нет". Для преобладающего большинства признаков надежность была близка к 50% - нет разделения. Для трех признаков разделение по эталонам оказалось надежным: для  $\Delta Z$   $\delta = 100\%$ , для  $\rho_k$   $\delta = 79\%$ , для коэффициента регрессии  $\Delta Z$  и  $\eta_k(R_{\Delta z, \eta})$   $\delta = 87,5\%$ . Для экзамена была выбрана вторая рудная жила. Изучение полей над ней показало, что амплитуда магнитного поля является неустойчивым признаком из-за влияния тренда, и высокая надежность разделения на эталоне, - явление случайное. По признакам  $\rho_k$  и  $R_{\Delta z, \eta}$  для рудного и безрудного эталонов была построена точечная диаграмма /рис. 7/ и проведена граница разделения рудных и безрудных сочетаний этих признаков. Уравнение границы имеет вид:

$$y = -0,08x + 4,2,$$

где  $y = \ln \rho_k$  ;  $x = R_{\Delta z, \eta}$ .

При значениях дискриминантной метки  $\alpha_i$ , определяемой по формуле  $\alpha_i = \ln \rho_k + 0,08 R_{\Delta z, \eta}$  и меньших 4,2, - точка относилась к классу "Да", а при  $\alpha_i > 4,2$  - к классу "Нет". Проверка на участке экзамена дала ошибку пропуска цели в 10% и ошибку ложного отнесения в 15%, т.е. суммарная надежность прогноза составила 75%. Для повышения надежности прогноза желателен переход к геофизическим материалам масштаба 1:500 и работа с первичными фактическими данными вместо карт изолиний, на которых качество материала заметно ухудшено.

Видна связь выявленных информативных параметров  $\rho_k$  и  $R_{\Delta z, \eta}$  с интенсивностью метасоматоза. Пониженными значениями  $\rho_k$  в пределах жилы отмечаются места с повышенной проницаемостью, а отрицательные значения коэффициента регрессии  $R_{\Delta z, \eta}$  характеризуют участки локального повышения содержания сульфидов и разрушения магнетита в процессе метасоматоза, приводящего к накоплению рассеянного рудного компонента.

Проведенные исследования позволяют сделать следующие выводы.

Геофизические методы могут достаточно эффективно использоваться при поисках редкометаллических месторождений. Но эффективность отдельных методов, входящих в комплекс, меняется в зависимости от масштаба исследований. В масштабе 1:10000, когда задача заключает-

ся в выявлении зон окварцевания, наиболее информативным оказался метод ВП, причем  $\rho_k$  обеспечило большую надежность разделения, чем  $\eta_k$ . В масштабе 1:2000, когда исследуются зоны метасоматических изменений, несущие оруденение, наиболее информативными оказываются параметры  $\Delta T$ ,  $\eta_k$  и особенно коэффициент корреляции между ними  $K_{\eta T}$ .

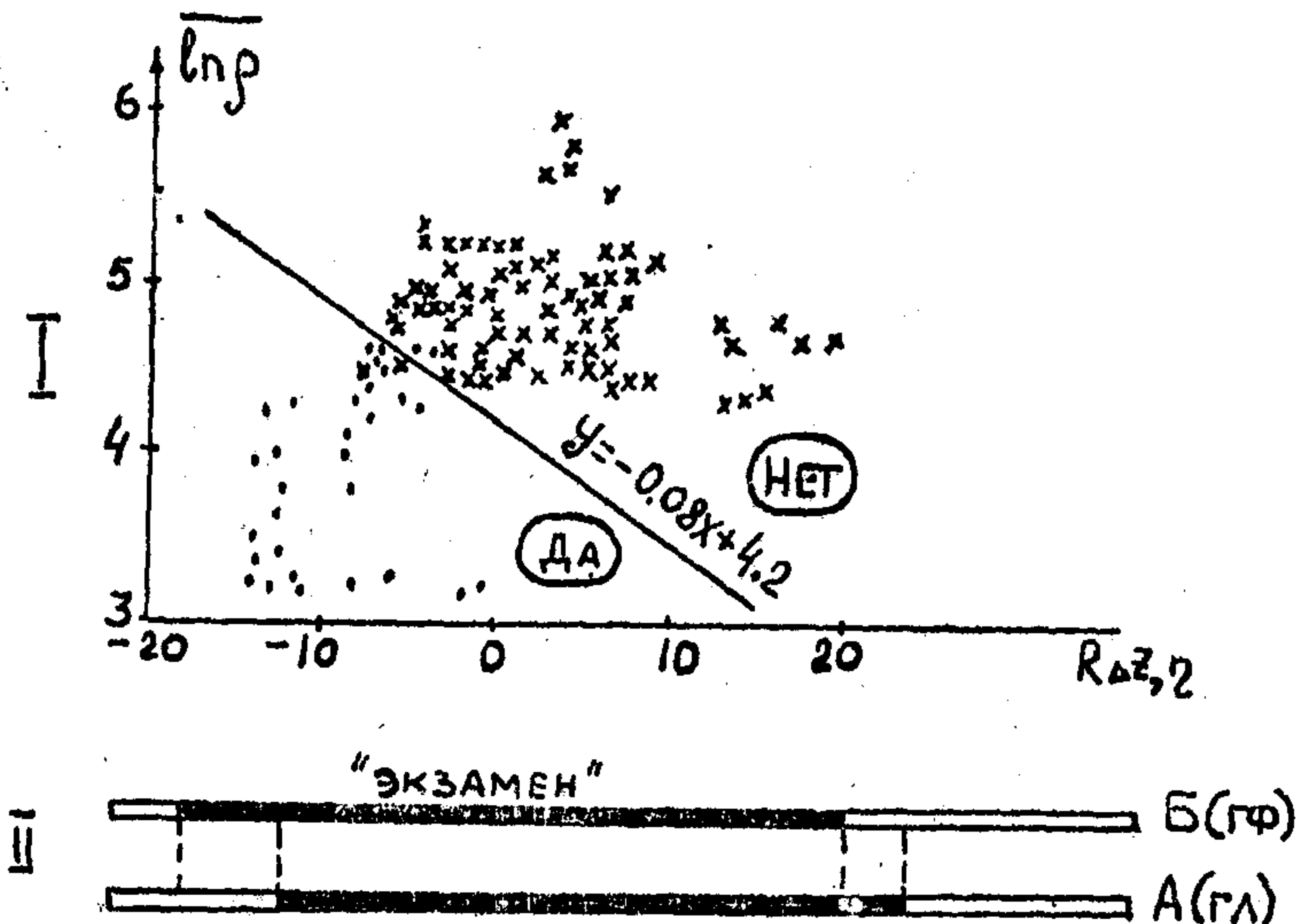


Рис. 7. I - точечная диаграмма и граница разделения участков обучения "Да" и "Нет" по простиранию рудной жилы.  
II - результаты "экзамена", проведенного с помощью точечной диаграммы

В благоприятных условиях оказывается возможным прогноз концентраций рассеянного рудного вещества по комплексу геофизических признаков. Для этого необходимо осуществлять прогноз не поточно, а интервально, с ориентацией площадок осреднения параллельно простиранию рудной зоны по линии наименьшей изменчивости параметров. Длина участка осреднения выбирается экспериментально, в нашем случае она составила 100 м. Необходимо учитывать закон распределения параметров /в частности, для  $\eta_k$ ,  $\rho_k$  и  $S$  он оказался логнормальным/, использовать не только амплитудные, но и корреляционные

признаки, которые оказались весьма информативными, особенно *Крт.*

Оказывается возможным разделение рудных и нерудных интервалов по простиранию рудных жил. Но решение этой задачи сильно затрудняется недостаточной детальностью исследования.

Тесная связь геофизических параметров с вторичными изменениями пород и руд окварцевание, метасоматоз, оруденение позволяет не только объяснить те или иные изменения геофизических полей в пределах рудоперспективных площадей, но по изменениям геофизических полей делать заключения, какого рода вторичные изменения произошли.

Таким образом, метод вызванной поляризации позволяет в комплексе с другими геофизическими и геохимическими методами успешно решать широкий класс задач изучения рассеянного редкометалльного оруденения.

#### БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Модин И.Н., Шевнин В.А. Обработка данных ВП для выделения и оценки перспектив слабых аномалий поляризуемости. - В кн.: Прикладная геофизика, вып. 113, 1985, с. 33-42.
2. Тархов А.Г., Бондаренко В.М., Никитин А.А. Комплексирование геофизических методов. М.: Недра, 1982.
3. Модин И.Н., Шевнин В.А. Соответствие данных электроразведки логнормальному закону распределения. - В кн.: Прикладная геофизика, вып. 109, 1984, с. 75-82.
4. Сборник научных программ на Фортране / Под ред. С.Я. Виленикина. т. I и 2. М.: Статистика, 1974.
5. Боровко Н.Н. Оптимизация геофизических исследований при поисках рудных месторождений. Л.: Недра, 1979.

Московский государственный  
университет