

УДК 551.243+550.83

ПРИМЕНЕНИЕ ФАКТОРНОГО АНАЛИЗА ГЕОЛОГО-ГЕОХИМИЧЕСКИХ И ГЕОФИЗИЧЕСКИХ ПАРАМЕТРОВ ДЛЯ ПРОГНОЗА ОРУДЕНЕНИЯ НА БОБРИКОВСКОМ ЗОЛОТОРУДНОМ МЕСТОРОЖДЕНИИ

Агаркова Н.Г.

(УкрНИМИ, г. Донецк, Украина)

Вивчення внутрішньої будови родовища при спільному дослідженні геолого-геохімічних і геофізичних даних з геологорозвідувальних і геофізичних профілів методу АМТЗ з використанням факторного аналізу дозволило виділити структурно-речовинні комплекси для петрофізичної характеристики розрізу та інтерпретації даних площових геофізичних досліджень методом АМТЗ і визначити пошукові геолого-геофізичні ознаки зрудніння.

Studying of an internal structure of the field at joint investigation of geologic-geochemical and geophysical data by geological survey and geophysical lines of AMT sounding technique using combined analysis has allowed identifying structural-compositional complexes for petrophysical description of the section and interpretation of the areal geophysical survey by AMT sounding and specifying prospecting indications of mineralization.

Проблема золотоносности многочисленных рудопроявлений Донбасса до сих пор привлекает внимание геологов и не потеряла своей актуальности. Для известных месторождений созданы геолого-генетические и тектоно-физические модели, изучены структура, литогенетические и метасоматические изменения вмещающих пород, минеральный состав руд, последовательность формирования рудопроявлений, состав флюидов и растворов,

фізико-хімічні умови мінералоутворення. Найбільше вивченим, і, як вважається, найбільш перспективним, в межах Нагольного кряжа є Бобриківське родовище. Тут були проведені перші спроби пошуку золота відкритим способом.

Результати раніше проведених геоелектричних досліджень на золоторудних родовищах Донбасу мають якісні характеристики [1]. При виділенні перспективних площей шляхом порівняння еталонних геолого-геофізичних характеристик з параметрами прогнозних геоелектричних карт, для оцінки геологічних ознак в геоелектричних полях необхідні кількісні петрофізичні характеристики.

Всі відомі в Нагольному кряжі рудопроявлення знаходяться в дуже схожих геолого-структурних умовах. Інтенсивність рудення і його характер, за думкою А.І. Резнікова [2], в значительній мірі залежать від різноманітного поєднання рудофокусувальних (присвоєві частини антиклинальних складок II порядку) і рудомістких структур (тріщинні системи, зони відшарування і міжпластових срывів деформованих шаруватих товщ, дорудні скипіння, ділянки перетинання тріщинами порід, сприятливі для рудного метасоматоза). Тому пошукові ознаки, пов'язані з ділянками рудення (критерії рудоносності), виділені на еталонному Бобриківському родовищі за комплексом геолого-геохімічних і геофізичних даних, справедливі для прогнозування в межах мало вивчених площей Нагольного кряжа.

В межах Бобриківського рудного поля силами УкрНІМІ виконані геофізичні роботи методом АМТЗ, в тому числі і через рудний штокерк площею 120×250 м. До глибини 300 м штокерк має неправильну складну форму в поперечних сеченнях і субвертикальне стовпоподібне залягання. Його просторовий орієнтування визначається золотоносними субмеридіональними «стержневими» жилами (0,5-1,2 м) переважно сульфідного складу. Рудами є в різній мірі змінені породи, представлені тонким переслаиванням піщаників, алевролітів, аргілітів і їх

углефицированных разностей, содержащих различные по морфологии вкрапленные и жильно-прожилковые кварц-карбонат-галенит-сфалеритового состава небольшой мощности (до 8 – 10 см) золотосодержащие образования.

Золоторудные месторождения в углеродистых формациях являются сложными объектами для поисков геофизическими методами. Это, в первую очередь, обусловлено тем, что зоны с золотосульфидным оруденением не имеют четких границ и пространственно тесно связаны с пачками углеродсодержащих пород, имеющих сходные физические параметры. Однако сами рудовмещающие углеродсодержащие породы, подверженные гидротермальному метаморфизму, отличаются по интенсивности физических полей от пород окружающей среды.

Рудные тела Бобриковского штокверка не имеют физических границ и выделяются только по данным опробования в центральных частях комплексного полиэлементного ореола в местах пространственного совпадения прожилково-жильной минерализации с интенсивной вкрапленностью пирита и арсенопирита. Учитывая этот факт наиболее перспективным для выделения структурно-вещественных комплексов (СВК), с одновременным учетом изменчивости электросопротивления, геохимических, структурно-морфологических характеристик, представляется факторный анализ как метод многомерной статистики, основанный на анализе мер неоднородности и связей между ними.

Опираясь на определение Г.С. Вахромеева [3], структурно-вещественный комплекс - это совокупность геологических образований, объединенных по геолого-геохимическим, структурным и др. признакам, имеющих «эффективные» физические характеристики. Эквивалентность различных групп пород по геохимическим и физическим свойствам приводит к необходимости их объединения в СВК.

К анализу привлекались данные спектрального анализа по трем геологоразведочным профилям I-I', II-II', IV-IV', в непосредственной близости от которых расположены профили наблюдений методом АМТЗ. Так как точки опробования керна скважин и точки зондирования не совпадают в плоскости разреза

из-за искривления скважин для анализа, массив данных сформирован из точек зондирования по пикетам, расположенных как можно ближе к стволу скважины с учетом ее инклинометрии. Учитывая, что расстояние по глубине между точками зондирования составляет 10 м и суммарная мощность и количество рудных прожилков посчитаны на 10-й метровый интервал, данные по опробованию приведены к средневзвешенному на 10 м разреза с координатной привязкой точки к середине интервала.

При проведении факторного анализа возникает вопрос «Какое число факторов должно быть сохранено?» Некоторые исследователи [3, 4] предлагают сохранять столько факторов, сколько имеется собственных чисел, больших единицы, т.е. те факторы, которые дают больший вклад в дисперсию, чем исходные переменные. Такое решение нередко приводит к потере переменных, имеющих слабые корреляционные связи с другими переменными, но дающие вклад в дисперсию, близкую к единице. В качестве методической основы для однозначного определения количества факторов использовался предложенный М.К. Овсовым [5] алгоритм исследования геохимических переменных комбинированным методом кластерного и факторного анализов.

Обработка данных включала в себя три этапа: на первом этапе методом главных компонент дается ортогональное описание исходных переменных, на втором - методом кластер-анализа изучается структура переменных в ортогональной системе координат главных компонент и выделяются уровни неоднородности в организации переменных; на третьем – осуществляется факторное описание переменных. Идея заключается в том, чтобы с помощью кластерного анализа выделить группы близких переменных и ограничить множество возможных решений факторного анализа.

Рассмотрим этапы обработки данных на примере фрагмента профиля АМТЗ через рудный штокер. Первый этап обработки связан с вычислением матрицы парных коэффициентов корреляции, которая служит отправной точкой всех методов факторного анализа (табл. 1). Факторные описания можно

рассматривать как математическую модель системы наблюдаемых переменных, взаимоотношения которых зафиксированы в корреляционной матрице. Исходными данными для анализа являются: As, Sb, Pb, Ag, Zn, Au – элементы-индикаторы золотополиметаллической минерализации (данные полуколичественного спектрального анализа керна скважин), sum, N – суммарная мощность и количество рудных прожилков на 10 м разреза, ρ_{yx} – значения поперечного удельного электросопротивления в точках зондирования АМТЗ, h – глубинная привязка точки исследования в плоскости разреза.

Таблица 1
 Матрица корреляции исходных данных по профилю АМТЗ через рудный штокверк

	sum	N	As	Sb	Pb	Ag	Zn	Au	ρ_{yx}	h
sum	1,00	0,67	0,00	0,16	0,21	0,22	0,27	0,32	0,15	-0,08
N	0,67	1,00	-0,06	0,06	0,15	0,09	0,19	0,23	0,28	-0,21
As	0,00	-0,06	1,00	0,42	0,54	0,63	0,50	0,34	0,12	-0,19
Sb	0,16	0,06	0,42	1,00	0,76	0,63	0,71	0,19	0,16	-0,06
Pb	0,21	0,15	0,54	0,76	1,00	0,82	0,87	0,38	0,19	-0,12
Ag	0,22	0,09	0,63	0,63	0,82	1,00	0,73	0,19	0,13	-0,26
Zn	0,27	0,19	0,50	0,71	0,87	0,73	1,00	0,28	0,31	-0,25
Au	0,32	0,23	0,34	0,19	0,38	0,19	0,28	1,00	0,27	-0,03
R_{yx}	0,15	0,28	0,12	0,16	0,19	0,13	0,31	0,27	1,00	-0,25
h	-0,08	-0,21	-0,19	-0,06	-0,12	-0,26	-0,25	-0,03	-0,25	1,00

Примечание: жирным шрифтом выделены значащие коэффициенты корреляции при 0,95-процентном уровне значимости

Из матрицы парных корреляций видно, что с глубиной уменьшается количество рудных прожилков и содержание основных рудообразующих элементов, наблюдается тесная положительная корреляционная связь между элементами, что не противоречит геологической модели месторождения. А именно: с глубиной количество рудных прожилков уменьшается; мышьяк – индикатор ранней березитовой стадии минералообразования, который в повышенных содержаниях кроме жильных образований так же характеризует и вкрапленную пирит-арсенопиритовую минерализацию; свинец, цинк, серебро характеризуют полиметаллическую минеральную ассоциацию с

жильным пиритом, сурьма – индикатор поздней стадийной сульфидно-сульфосольной минеральной ассоциации, минералы которой присутствуют в жилах полиметаллической минеральной ассоциации. Золотоносность минеральных ассоциаций различна, наиболее богаты жильные образования в местах совпадения с вкрапленной минерализацией. Количественное соотношение минеральных ассоциаций определяет промышленную ценность оруденения. Наиболее благоприятны участки, где пространственно развиты все три минеральные ассоциации.

На первом этапе проводилось разложение корреляционной матрицы всех участвующих в анализе переменных на главные компоненты. В нашем случае главные компоненты используются для ортогонального определения исходных переменных, поэтому количество компонент соответствует количеству переменных. В итоге получаем матрицу факторных нагрузок A (9×9). Далее по значениям матрицы факторных нагрузок строилась матрица расстояний между переменными с определением меры сходства по евклидову расстоянию. Результат процедуры – дендрограмма, выбор уровней неоднородности ($U_{р.н}$) в которой осуществлялся по графику функции межкластерного расстояния d , на котором межгрупповым интервалам соответствует ступень на фоне полого монотонного возрастания (рис. 1). Количество групп переменных (ассоциаций) определялось путем разделения дендрограммы чертой на постоянном значении межкластерного расстояния. Вниз от черты определяется состав ассоциаций и взаимоотношение переменных внутри групп. Вверх от черты к корню дерева определяется взаимоотношение между группами переменных, т.е. ассоциаций, структурно-морфологических и геофизических признаков.

Полученные группы характеризуются минимальными внутригрупповыми и максимальными межгрупповыми дисперсиями, что является наиболее естественным с точки зрения отношения исходных переменных. Ассоциация элементов ниже уровня неоднородности 1 характеризует геохимическую специализацию месторождения: группа Ag, Zn, Pb – галенит-сфалеритовые прожилки + Sb – минералы (сульфосоли) которого образуют, как самостоятельные прожилки так и присутствуют в

жилах кварц-карбонат-галенит-сфалеритового состава второй минеральной ассоциации + As – вкрапленные и жильные пириты; Au- образует самостоятельную группу так как формирует самородные агрегаты, вкрапленники и включения в пиритах первой и второй минеральных ассоциаций; прожилки образуют отдельную группу, т.к. наряду с сульфидными прожилками присутствуют безрудные кварц-анкеритовые или прожилки смешенного состава. Сопротивление в большей степени отражает электрические свойства вмещающих пород (низкие для углистых аргиллитов и повышенные для песчаных разностей), на изменение которого влияет степень и состав минерализации. Уровень неоднородности 2 характеризует структуру геохимического поля, геоэлектрического и структурно-морфологического.

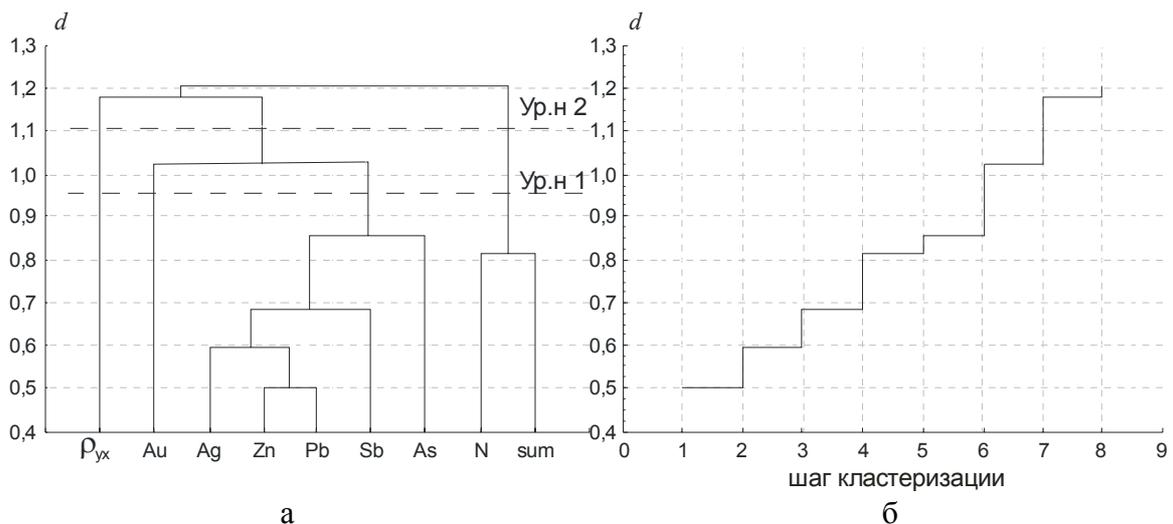


Рис. 1. Дендрограмма кластеризации (а) и график функции межкластерного расстояния d (б)

Главная цель факторного анализа - получить геоэлектрическую характеристику рудной залежи. Для этого возьмем число факторов, определяемое уровнем неоднородности 2 (Ур.н 2).

Исходной для факторного анализа была корреляционная матрица (табл.1), по которой выделено три фактора F_1 , F_2 , F_3 (табл. 2), учитывающих соответственно 44,2; 19,2; 12,5 суммарной дисперсии анализируемой выборки (табл. 3).

Анализ нагрузок на факторы показывает, что F_1 отражает ассоциацию элементов спутников золота с тесными корреляционными связями. Фактор F_2 характеризует область развития жильно–прожилковой минерализации. Фактор F_3 объединяет Au и сопротивление пород в отдельный признак, который определяется многостадийностью образования золота.

Таблица 2
 Факторные нагрузки для заданных трех факторов

	Фактор 1	Фактор 2	Фактор 3
sum	0,163	0,883	-0,091
N	0,009	0,887	0,162
As	0,694	-0,189	0,214
Sb	0,829	0,076	0,030
Pb	0,924	0,117	0,176
Ag	0,900	0,091	0,010
Zn	0,860	0,212	0,203
Au	0,249	-0,211	0,772
ρ_{yx}	0,060	0,308	0,774

Таблица 3
 Собственные значения и собственные векторы

	Собственные значения	Вклад собственного значения в суммарную Дисперсию, %	Сумма вкладов в дисперсию, %
Фактор 1	3,98	44,22	44,22
Фактор 2	1,72	19,16	63,37
Фактор 3	1,13	12,52	75,89

Положительный знак факторной нагрузки указывает на прямую (а отрицательный знак - на обратную) связь данного признака с фактором. Так, высокие содержания мышьяка не всегда связаны с жильно-прожилковой минерализацией, так как пириты помимо жильной образуют и вкрапленную минерализацию, оказывающую влияние, хотя и слабое, на изменение сопротивления. Такое же объяснение имеет и слабая отрицательная связь золота с прожилками, так как не все они золотоносны, а уровень концентраций золота контролируется не только сочетанием разрывных структур, но и литолого-фациальными особенностями вмещающих пород и, в первую

очередь, наличием осадочного пирита. Область пересечения факторных меток трех факторов соответствует зоне штокверка, где развиты все стадийные минеральные ассоциации (рис. 2).

Для выделения структурно-вещественных комплексов использовалась разновидность кластерного анализа - метод кластеризации К-средним с количеством групп, соответствующих понятиям рудный участок (руды с высоким содержанием золота 2-4 г/т), бедные руды (преимущественное развитие вкрапленных золотоносных пиритов с содержанием золота до 1 г/т) и слабооруденелые и безрудные минерализованные зоны (рядовые руды на уровне концентраций 0,01-0,1 г/т).

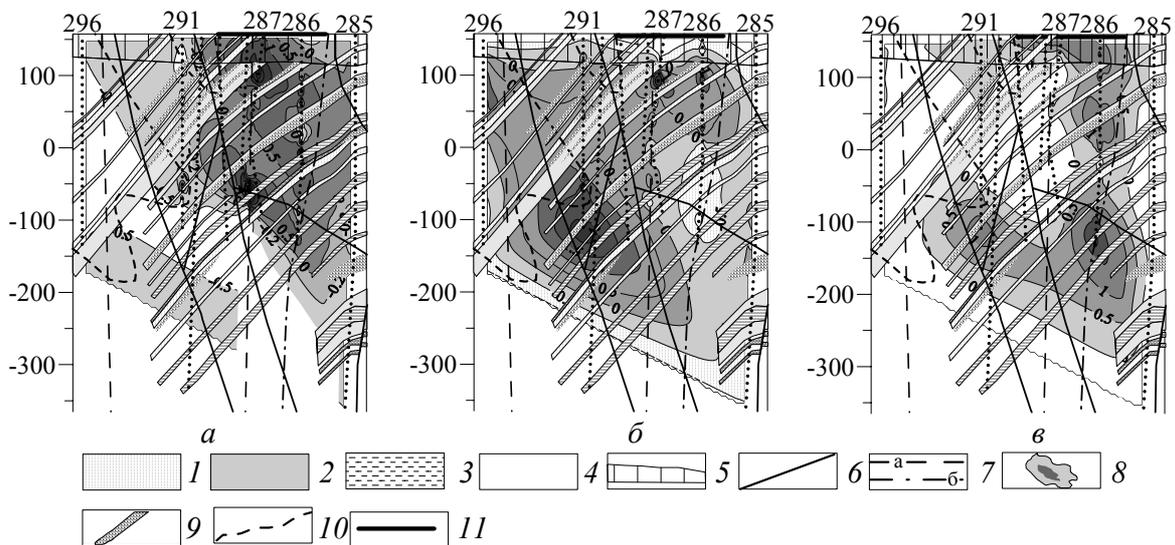


Рис. 2. Распределение значений факторных меток пространства F_1 (а), F_2 (б), F_3 (в) в пределах рудного штокверка:

1 - песчаники, 2- углистые аргиллиты, 3 - алевролиты, переслаивание алевролитов, аргиллитов, песчаников, 4 - аргиллиты, 5 - зона окисления, 6-7: 6- тектонические нарушения по данным бурения, 7- по геофизическим данным, 8 - изолинии распределения факторов, 9 - вкрапленная пирит-арсенопиритовая минерализация, 10 – граница внутренней зоны березитизации (преобладание кварца над серицитом), 11- проекция штокверка

Таким образом, при разбивке значений факторных меток пространства F_1 , F_2 , F_3 получаем три различных кластера, расположенные на возможно больших расстояниях друг от друга.

Граничные значения для классов и их интерпретация приведены в табл. 4, а распределение точек опробования, принадлежащих разным классам в пределах штокверка на геоэлектрическом разрезе по профилю АМТЗ, показано на рис. 3.

Кластер 1 – золоторудная область вкрапленной пирит-арсенопиритовой минерализации, сульфидных, кварц-карбонат-сульфидных и кварц-карбонат-сульфидно-сульфосольных прожилков в центральной зоне интенсивно березитезированных вмещающих пород.

Таблица 4

Параметры и интерпретация классов, выделенных по факторным меткам пространства F_1, F_2, F_3

№ клас-тера	Граничные значения факторов			Характеристика класса
	F_1	F_2	F_3	
1	(-0,5)-4,2	(-1,6)-3,6	(-0,6)-4,9	Интенсивная аномалия всех признаков
2	(-0,5)-0,5	(-0,2)-1,8	(-1,1)-0,2	Интенсивная аномалия F_2 (фактор прожилкования), характеризующего преимущественное развитие кварц-карбонатных прожилков и слабые аномалии факторов F_1 и F_3
3	(-0,6)-8,2	(-2,0)-0,2	2,4-1,9	Умеренная аномалия всех признаков

В березитезированных песчаниках центральной зоны (по сравнению со слабо измененными породами) наблюдается преобладание кварца над серицитом, что оказывает существенное влияние на изменение сопротивления в сторону увеличения. Кластер 2 - преимущественное развитие кварц-карбонатных прожилков с умеренной сульфидной галенит-сфалеритовой (нижний порог аномального содержания) и вкрапленной пирит-арсенопиритовой минерализацией. Кластер 3 – область разряженных маломощных кварц-карбонат-сульфидных прожилков и интенсивной вкрапленной пирит-арсенопиритовой и галенит-сфалеритовой минерализации первой стадии.

Обобщенные параметры выделенных СВК приведены в табл. 5, а распределение в плоскости геоэлектрического разреза на рис. 3.

Таблица 5

Характеристика СВК, выделенных методом факторного анализа по совокупности геохимических и электрических признаков

№ кластера	Характеристика СВК	sum	N	As	Sb	Pb	Ag	Zn	Au	R _{yx}
1	Богатые руды – зона интенсивной жильно-прожилковой кварц-анкерит-сульфидной и вкрапленной пирит-арсенопиритовой минерализации)	<u>152,0</u>	<u>36,3</u>	<u>294,6</u>	<u>7,20</u>	<u>164,8</u>	<u>0,50</u>	<u>241,5</u>	<u>0,30</u>	<u>90,0</u>
		138,4	17,3	238,8	5,807	160,7	0,57	165,8	0,37	30,85
3	Бедные руды – зона умеренного развития кварц-анкерит-сульфидной и интенсивной вкрапленной минерализации	<u>37,6</u>	<u>11,35</u>	<u>248,4</u>	<u>4,41</u>	<u>61,85</u>	<u>0,32</u>	<u>99,5</u>	<u>0,07</u>	<u>34,5</u>
		31,24	7,66	217,2	9,06	131,5	0,50	137,72	0,163	21,4
2	Рядовые руды – зона интенсивного развития слабооруденелых и безрудных прожилков с умеренной вкрапленной минерализацией	<u>126,6</u>	<u>30,9</u>	<u>108,8</u>	<u>1,99</u>	<u>29,20</u>	<u>0,20</u>	<u>63,08</u>	<u>0,012</u>	<u>38,70</u>
		57,14	11,2	95,5	1,51	33,51	0,13	53,63	0,035	16,46

Примечание: в числителе - среднее значение элемента $n \cdot 10^{-3} \%$ по комплексу, в знаменателе - стандартное отклонение

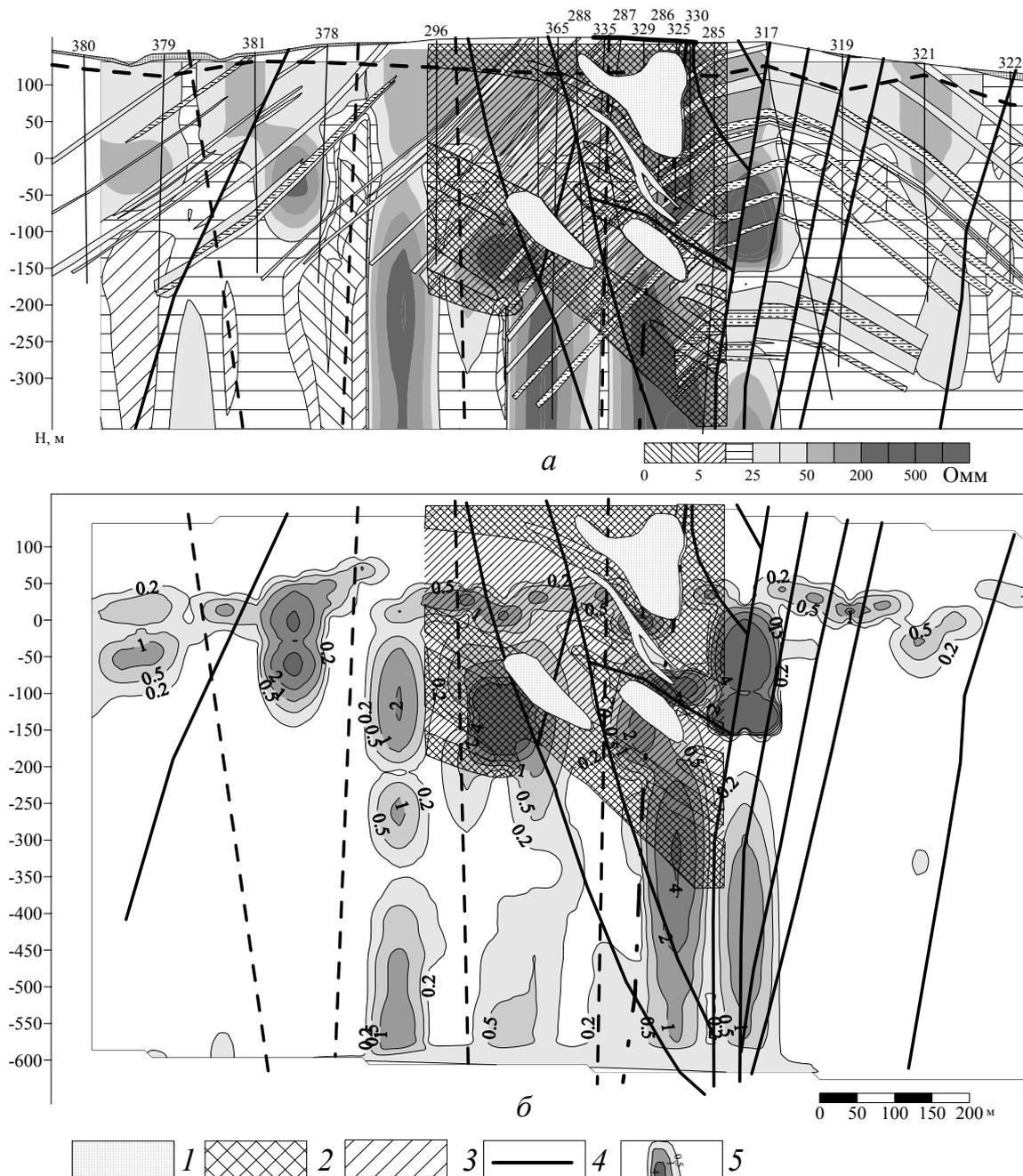


Рис. 3. Распределение структурно-вещественных комплексов в плоскости геоэлектрического разреза данных АМТЗ (а) и вертикальный градиент электросопротивления (б):

1 - СВК-1: богатые руды – пространственное совмещение минерализации всех трех стадий минералообразования, 2 - СВК-2: бедные руды - преимущественное развитие березитовой стадии минералообразования, 3 - СВК-3: рядовые руды – кварц-карбонатные прожилки с бедной полиметаллической и сульфидно-сульфосольной минерализацией в пределах пород с вкрапленной пирит-арсенопиритовой минерализацией; 4 - проекция рудного штокверка; 5 - значения вертикального градиента электросопротивления

Для области развития всех стадий минерализации (богатые руды- СВК-1) характерны более высокие сопротивления (от 50 до 100 Ом·м), чем для областей бедных и рядовых руд. В верхней части разреза градиент сопротивления незначительный за счет нивелирования сопротивления от низкоомных углистых аргиллитов густой сетью кварц-карбонатных прожилков в березитезированных вмещающих породах в сторону увеличения.

Области бедных и рядовых руд (СВК-2, СВК-3) характеризуются практически одинаковым относительно низким сопротивлением и более широким диапазоном изменения от 5 до 50 Ом·м.

Низкоомные аномалии на геоэлектрическом разрезе образуют углистые аргиллиты с незначительным количеством рудных прожилков и вкрапленной минерализацией.

Границы резкого изменения сопротивлений от низких к высоким отражаются на разрезе распределения вертикального градиента сопротивлений в виде области повышенных значений градиента (рис.3 б).

Изолинии высоких сопротивлений (более 200 Ом·м) на геоэлектрическом разрезе (рис.3а) вероятнее всего отражают наличие кварцевых и кварц-карбонатных прожилков первой и четвертой безрудной стадий минералообразования вдоль рудоконтролирующих сбросов трещинные системы которых, неоднократно приоткрывались. Изолинии низкого сопротивления от 1 до 25 Ом·м в безрудной зоне (скв. 380-378 и 319-322) отражают развитие слабоизмененных углистых аргиллитов и зоны пострудных широтных и субмеридиональных тектонических нарушений.

На разрезе распределения значений вертикального градиента электросопротивления (рис. 3б), рассчитанного на 10 метровый интервал по пикетам, видно, что для минерализованной зоны характерна значительная скорость изменения сопротивления по вертикали, что свидетельствует о разной степени изменения вмещающих пород, в то время, как в безрудной зоне градиент равен нулю, за счет «затягивания» сопротивления на глубину от кровли проводника до кровли изолятора.

Таким образом, рудная зона характеризуется объемной дифференциацией сопротивлений со значениями от 10 до 1000 Ом·м, что является одним из поисковых признаков. Следует отметить, что количественно охарактеризованные структурно-вещественные комплексы расшифровывают природу электромагнитных аномалий, а именно: для высокотемпературных метасоматитов характерно увеличение удельного электросопротивления, для низкотемпературных - уменьшение.

ВЫВОДЫ

Методом факторного анализа выделены более информативные новые признаки в виде линейных комбинаций тех исходных признаков, для которых характерна синхронная изменчивость и максимальная дисперсия. Полученные новые переменные (значения факторов) в исходных точках наблюдений не коррелируют между собой и имеют дисперсию равную единице, что позволило использовать их при классификации объектов методом кластерного анализа. В результате этого, в небольшом числе факторов заключена информация о результатах наблюдений в более компактной форме, что обеспечивает изображение информации при меньшем количестве карт или разрезов. Матрица факторных нагрузок является матрицей перехода от новых переменных к старым, ее значения – одновременно являются и коэффициентами регрессии, и коэффициентами корреляции новых переменных со старыми. Таким образом, получена количественная оценка связи между геофизическими и структурно-вещественными характеристиками месторождения, что необходимо при интерпретации результатов площадных геофизических исследований методом АМТЗ.

СПИСОК ССЫЛОК

1. Геоэлектрические модели золоторудных месторождений Украинского щита и Донбасса / Азаров Н.Я., Белявский В.В.,

- Гошовский С.В., Чуприна И.С., Шумлянский В.А.. — К.: Знание, 1999. — 160 с.
2. Резников А.И. Структурные условия локализации оруденения в рудном районе Нагольного кряжа // Геол. журн.-1975.-№ 1.- Т. 35. - С. 137-143.
 3. Вахромеев Г.С. , Даведенко А.Ю. Моделирование в разведочной геофизике. - М.: Недра, 1987. - С. 7-22.
 4. Дж. Девис Статистика и анализ геологических данных. -М.: Мир, 1997. - 571 с.
 5. .Овсов М.К Комбинированный метод кластерного и факторного анализов переменных в прикладной геохимии // Геология и разведка.- 1990. - № 1. - С. 60-65.