

## ГЕОЛОГО-ГЕОФИЗИЧЕСКИЕ АСПЕКТЫ ПРОГНОЗИРОВАНИЯ МЕДНОКОЛЧЕДАНОГО ОРУДЕНЕНИЯ НА СУХОЛОЖСКОМ ПОЛИГОНЕ В ЗАУРАЛЬЕ

После открытия в 1986 году в вулканитах толвент-риолитовой ассоциации Восточно-Уральского прогиба крупного Сафьяновского медно-цинкового колчеданного месторождения не прекращаются работы по исследованию геологического строения этой провинции и поискам новых месторождений. Научными работами Коровко А.В., Язевой Р.Г., Иванова К.С. [2, 3] и многих других установлено, что в пределах Восточно-Уральского прогиба на Среднем Урале колчеданные месторождения приурочены к вулканитам энзиматических островных дуг средне-верхнедевонского возраста.

В настоящей работе рассматривается геологическая позиция Шатинского (на западной окраине г. Сухой Лог) участка, включающего рудопроявление медно-цинковых вкрапленных руд в вулканитах непрерывно дифференцированной базальт-андезит-дацит-риолитовой формации [1]. Рудопроявление известно с начала 60-х годов XX века, опробовано комплексом геофизических методов и буровыми работами в 70-е годы. Структурно оно приурочено к Сухоложской, самой восточной из 3-4 палеовулканических колчеданосных гряд, установленных в прогибе. Каждая из них выходит на уровень эрозионного среза в виде гряды мощностью 3-6 км. Прогиб имеет ширину около 30 км, сложен вулканогенно-осадочными комплексами девона и карбона. Сафьяновское месторождение располагается в западной гряде, в 60 км к северо-западу от Сухоложского полигона. В развитии Восточно-Уральского прогиба могли быть, применительно к формированию вулканических гряд, различные варианты. Неблагоприятный из них – изменение, ослабление металлогенической специализации и продуктивности гряд при их различном пространственном расположении в прогибе. Благоприятный вариант – сохранение продуктивности вне зависимости от положения в прогибе. Вопрос о их одновременном или разновременном формировании в пределах прогиба при существующем уровне геологической изученности региона не ставим.

Воспользуемся опубликованными данными [3] о содержании основных породообразующих окислов в рудовмещающих горных породах Сафьяновского месторождения, а также опубликованными [1] и фондовыми петрохимическими материалами по Сухоложской колчеданосной вулканической гряде, и сравним их характеристики. Применим пересчет химических анализов по методу А. Н. Заварицкого и сведем результаты расчетов на диаграмму (рис. 1). Сравнение положения фигуративных точек составов околорудных пород с положением фигуративных точек пород нормальных составов дает важные сведения о степени и тенденциях преобразования исследуемой породы.

Для нас важно уяснить, что главные черты петрохимической характеристики горных пород Сафьяновского месторождения и Сухоложской гряды идентичны. Вулканиты обоих участков представлены непрерывно дифференцированной ассоциацией пород – от базальтов до риолитов. Так же значителен разброс значений суммарной щелочности пород, особенно андезит-базальтового состава. Для большинства образцов характерно относительное превышение содержания глинозема при относительном понижении содержания извести. Последнее приводит к понижению содержания в породе анортовой молекулы (параметр  $c$  снижается до 3-4). Но в целом для ассоциации вулканитов обоих участков содержание анортовой молекулы близко к нормальному. Для высокопродуктивных на медноколчеданное оруденение вулканитов Тагильского и Магнитогорского прогибов характерно существенное – до 1-3 – понижение параметра  $c$ . Наличие крупного Сафьяновского месторождения в относительно слабо преобразованных породах позволяет в целом благоприятно оценивать продуктивность и Сухоложской вулканической гряды.

Глубинное геологическое строение в районе Шатинского рудопроявления представляет собой фрагмент антиклинальной вулканической гряды, сложенной потоками и жерловыми фациями базальтов, переслаивающихся с туфами базальтов, андезитов, прорванных экструзивными телами риолитового состава (рис. 2). Метасоматические околорудные породы представлены массивным агрегатом кварц-серпент-хлоритового состава, образовавшимся, очевидно, при воздействии метасоматических растворов на фация вулканогенно-осадочных пород. Оруденение представлено [1] вкрапленной шпирит-сфалерит-халькопиритовой минерализацией, иногда с присутствием галенита.

Мощность оруденения, по опробованию керна скважин не превышает 1 м, содержание меди невысокое – до 0,5 %, на интервалах в 0,1-0,2 м иногда достигает 2-3 %. Оруденение не содержит промышленных запасов меди, цинка.

Отметим, что геологическое строение и характер залегания рудных горизонтов на Шатинском рудопроявлении сходны с таковыми на Султановском месторождении, располагающемся в 140 км южнее, возможно в той же Сухоложской гряде. Поперечное сечение рудоконтролирующей гряды на Султановском месторождении составляет всего 0,5-1 км. Разведанные запасы меди составляют десятки тысяч тонн. Сечение разведанной антиклинальной структуры на Шатинском рудопроявлении около 1 км, но мощность гряды вулканитов девона здесь более 3 км.

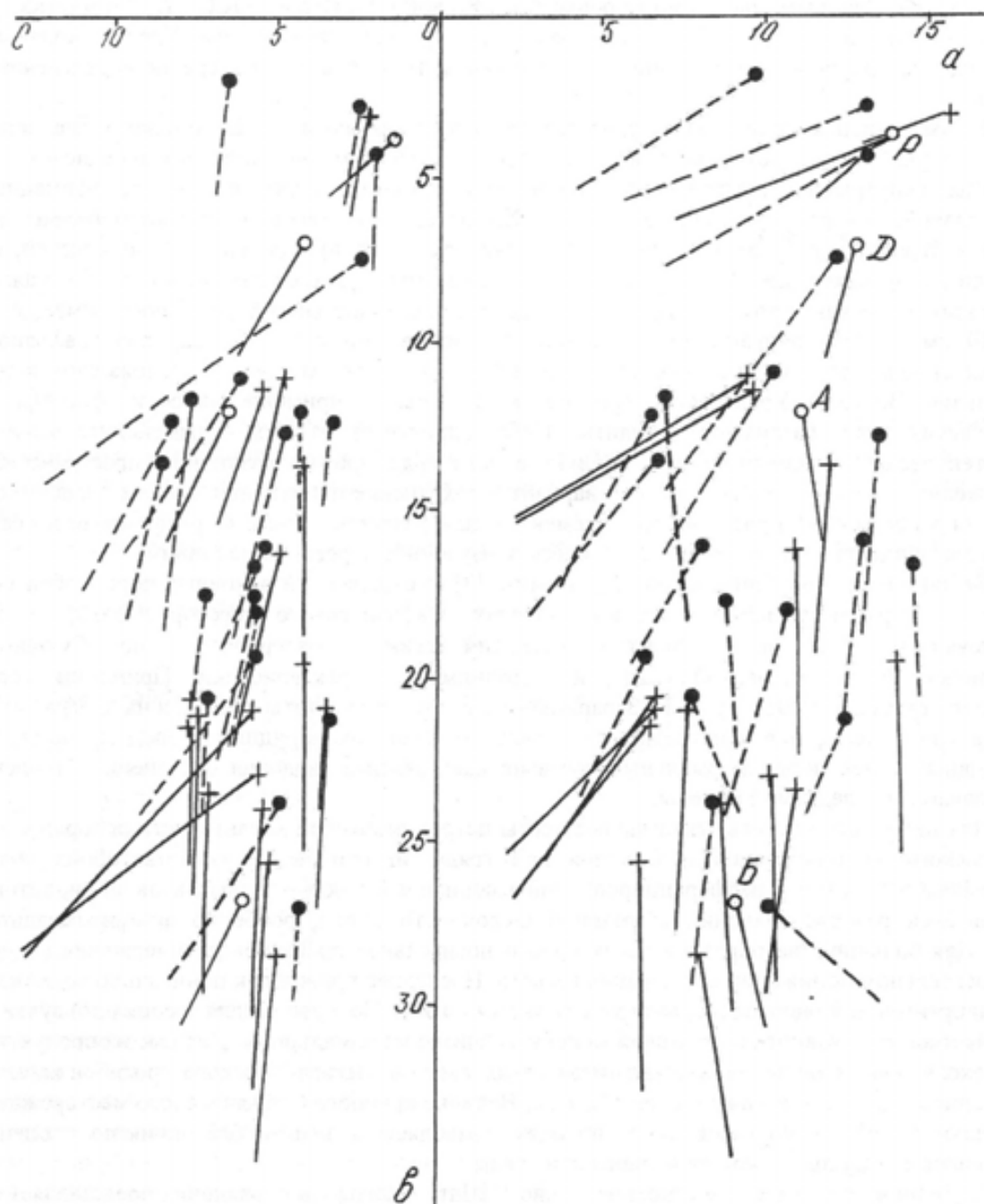


Рис. 1. Составы пород Сафьяновского месторождения (крестики) и Сухоложской гряды (сплошная линия векторов) на диаграмме А.Н. Заварицкого

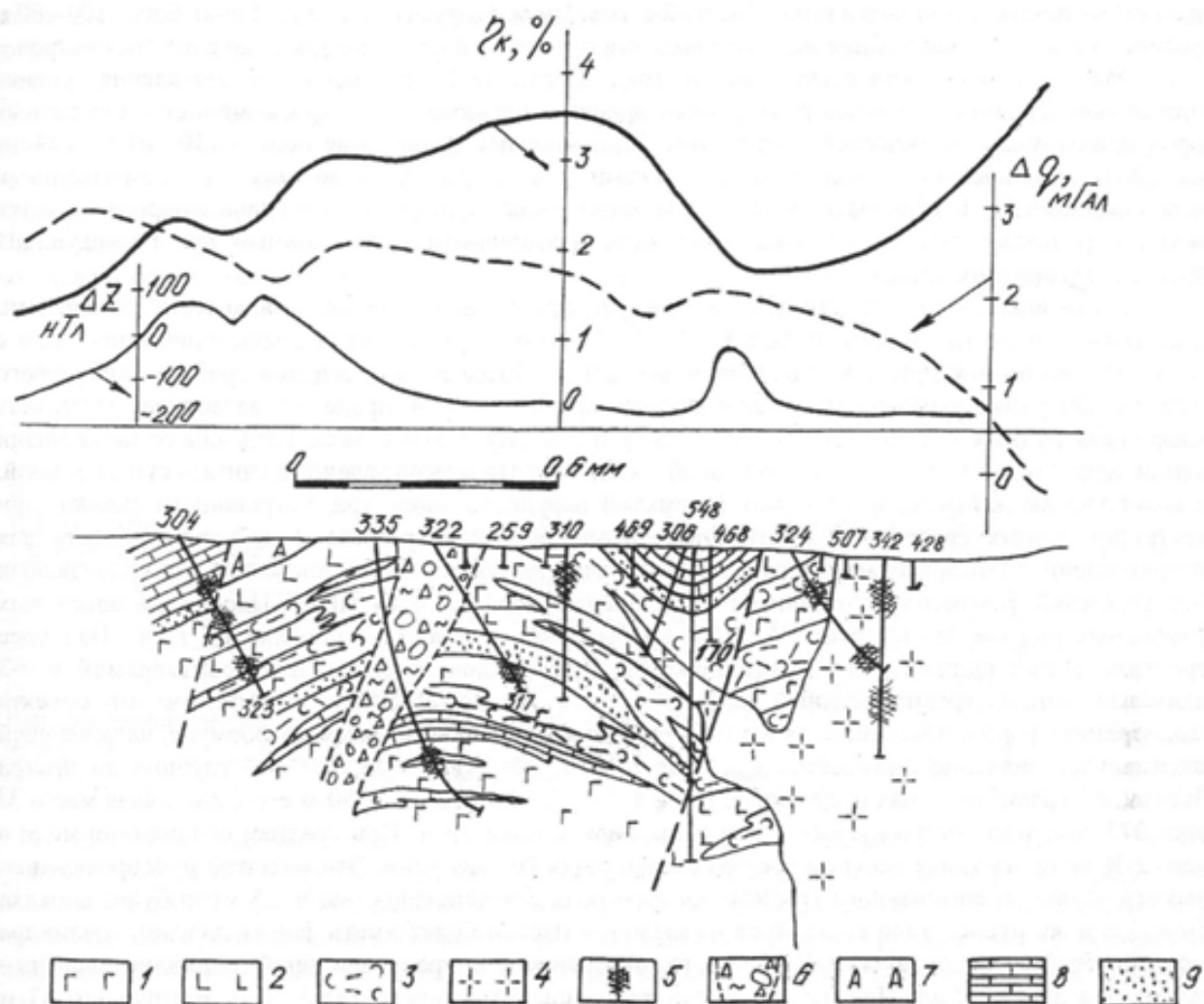


Рис. 2. Геологический разрез по линии 25+300 м Шатинского медноколчеданного рудопроявления и аномалии магнитного, гравитационного полей, вызванной электрической поляризации (По материалам Л.Г. Бурасова и др., 1973; И.Ф. Николаева, 1977; В.Н. Огородникова и др., 2002 [7]):

1 - базальты, 2 - андезито-базальты, 3 - туфы различного состава, 4 - кварцевые риолиты, 5 - сульфиды, 6 - жерловые лавобрекчи, 7 - агломератовые туфы, 8 - рифогенно-аккумулятивные известняки, 9 - туфоконгломераты и туфопесчаники

Обратимся к приведенной на рис. 2 геологической и геофизической характеристике Шатинского рудопроявления.

Существенная черта геолого-геофизической характеристики участка – наличие обширных (0,5x1 км) зон вкрапленной пиритной минерализации в метасоматических, эффузивных, экструзивных породах кислого, среднего, основного составов. Это приводит к появлению обширных по площади электроразведочных аномалий вызванной поляризации (ВП). Интенсивность их составляет 4-10 %. При таком объеме аномалий ВП их ценность в качестве поискового признака массивного колчеданного оруденения значительно снижается. По данным каротажа ВП разведочных скважин глубиной до 300-500 м, удельная электрическая поляризуемость импрегнированных пиритной минерализацией горных пород достигает 6-24 % по всему интервалу глубин. Очевидно, что для повышения поисковой ценности аномалий ВП следует исследовать поздние стадии поляризации, которая обусловлена электрохимическими процессами в массивных рудах. Такие же рекомендации можно сделать применительно к поисковым электроразведочным работам методами переходных процессов, индукции.

Удельное электрическое сопротивление (УЭС) блока рудовмещающих пород невысокое – порядка 300-1000 Ом·м. Окварцевание участков горных пород в зоне метасоматических изменений и

оруденения приводит к повышению УЭС до 2-5 тыс. Ом.м. Разрез гряды на глубинах более 100-200 м представляет собой чередование низкоомных и высокоомных пластов мощностью в десятки метров.

Магнитное поле над осевой частью гряды в районе Шатинского рудопроявления ровное пониженное. Это можно объяснить типичным процессом выноса магнитных компонентов из горных пород при их метасоматической проработке. Относительное повышение поля на 300 нТл в районе скв. 304 обусловлено микровкрапленниками магнетита в андезитах. Петромагнитными исследованиями И. Ф. Николаева в 70-е годы установлено, что магнетит в горных породах участка может быть первичным акцессорным минералом и вторичным, образованным при последующих метасоматических процессах.

Гравитационное поле над Шатинским рудопроявлением слабоаномальное, с локальными понижениями и повышениями не более 0,4-0,8 мГал. Отмечается региональное понижение поля с запада на восток, обусловленное наличием на востоке более легких осадков грабена карбонового возраста. Обсудим возможности гравиразведки при поисках в пределах палеодуги массивных сульфидных рудных тел. Оценим форму, массу и глубину рудного тела, создающего на площади съемки аномалию в 1 мГал. Аномалию такой интенсивности можно заведомо считать существенной, ее возможно выделить на фоне помех (аномалий нерудного характера, погрешности съемки, при отсутствии точных сведений о плотностных неоднородностях разреза и др.), использовать для интерпретации. Методическая литература [4] в качестве существенной аномалии для колчеданных месторождений рекомендует принимать отклонение порядка 0,45 мГал. Плотность массивных сульфидных руд составляет около 4,3 г/см<sup>3</sup>, избыточная плотность – порядка 1,5 г/см<sup>3</sup>. Наиболее вероятная форма рудных тел – линзообразная. При глубине рудного тела, соизмеримой с 2-3 радиусами линзы, гравитационный эффект от нее можно сравнить с эффектом от объекта шарообразной формы, имеющего ту же избыточную массу. Оценим массу по формуле, включающей максимальное значение аномалии ( $\Delta g_{\max}$ ) над шаром:  $M = (\Delta g_{\max} \cdot h) / k$ , где  $h$  – глубина до центра объекта;  $k$  – гравитационная постоянная. При глубине до центра шара 50 м его избыточная масса  $M$  будет 375 тыс. тонн, полная масса 1 млн тонн. Радиус шара 39 м. При среднем содержании меди в руде 2 % ее прогнозные ресурсы составят всего лишь 20 тыс. тонн. Это масштаб рудопроявления. Диаметр изолинии аномального гравитационного поля с интенсивностью в 0,5 мГал будет порядка 150 м. Если же рудное тело с такой же избыточной массой будет иметь форму плоского цилиндра высотой  $H=40$  м и радиусом  $R=43$  м, то интенсивность гравитационной аномалии над ним уменьшится до 0,2 мГал. При высоте цилиндра (мощности рудного тела) 10 м, радиусе его 87 м аномалия будет всего 0,11 мГал. Это очень малая величина на фоне локальных гравитационных аномалий нерудной природы. Чтобы гравитационная аномалия от дискообразных рудных тел, залегающих на глубине 50 м, была 1 мГал, масса их должна составлять 5 или 10 млн тонн. В работе [4] показано, что объекты с массой руды в 1-2 млн тонн могут быть обнаружены гравиразведкой, если они залегают на глубине не более 100 м. Но эти оценки приведены для рудных залежей в виде горизонтальных круговых цилиндров или крутозалегающих пластов. Из наших расчетов можно сделать вывод, что применение гравиразведки для прямого поиска пологозалегающих пластообразных, дискообразных массивных рудных тел будет эффективным, если масса руды достигает объема мелкого или среднего месторождения. Гравитационная аномалия при этом будет иметь пологие ветви, т. е. отличить ее от породных аномалий сложно без привлечения данных других геофизических и геологических методов.

Оценим возможности современной сейсморазведки методом общей глубинной точки для поиска массивных колчеданных рудных тел, локализованных среди вулканогенных и вулканогенно-осадочных фаций горных пород непрерывно дифференцированной базальт-риолитовой ассоциации. На основе геологического разреза Шатинского рудопроявления составим сейсмогеологическую модель поискового объекта (см. таблицу).

Как следует из расчетов коэффициента отражения, из девяти границ семь оказываются сильными, две – средними, но они располагаются в верхней части разреза, среди вулканогенно-осадочных пород, характеризующихся наличием относительно протяженных отражающих площадок, то есть предпосылки для выделения всех геологических границ по их динамическим характеристикам благоприятны. Неблагоприятные факторы для сейсморазведки следующие. Большинство отражающих границ в структуре вулканической гряды фрагментарны и криволинейны. Однако известно, что в пределах вулканических гряд самые крупные залежи массивных колчеданных руд формировались эксгальационно-осадочным путем среди фаций осадочных пород палеодепрессий. А последние сейсморазведкой можно выделять более уверенно. На кровле массивных пластообразных

колчеданных рудных тел будет образовываться интенсивная отраженная волна с прямой фазой колебаний. От подошвы – волна с обратной фазой колебаний. Так как пласт в сравнении с длиной волны тонкий, отраженные от кровли и подошвы залежи волны будут гасить друг друга. Интенсивность отраженной волны от подошвы верхнего рудного пласта в приведенной модели в 3 раза меньше; она только ослабит волну от кровли. Интенсивности волн от кровли и подошвы нижнего пласта соизмеримы, они могут погасить друг друга. Однако для упругих волн, падающих на кровлю рудного тела под углами 30-40°, соотношение между амплитудами волн изменится. Прошедшая в рудное тело волна приобретет угол порядка 40-50°, и от нее отраженная волна на подошве рудного тела будет иметь малую амплитуду. Суммирование трасс отраженных волн по методике ОГТ позволит на суммолентах выделить отражения от кровли рудного тела.

### Сейсмогеологическая модель колчеданосной вулканической структуры

Горная порода	Мощность, м	Скорость, м/с	Плотность, г/см <sup>3</sup>	Козф. отражения	Длина волны, м	Характеристика границы
Известняки	100	3000	2,65	-0,08	25-50	Слабая
Туфопесчаники	40	2600	2,60	0,06	22-44	-"
Туфы смешанного состава	100	2800	2,70	0,28	23-46	Сильная
Кварцевые риолиты	80	5000	2,68	-0,20	42-84	-"
Туфы смешанного состава	60	3200	2,70	0,33	27-54	-"
Руда	4	4000	4,35	-0,17	33-66	-"
Базальты	80	4500	2,75	0,27	38-76	-"
Руда	4	5000	4,35	-0,44	42-84	-"
Кварц-хлорит-серицитовый метасоматит	10	3000	2,80	0,2	25-50	-"
Базальты	100	4500	2,81		38-76	-"

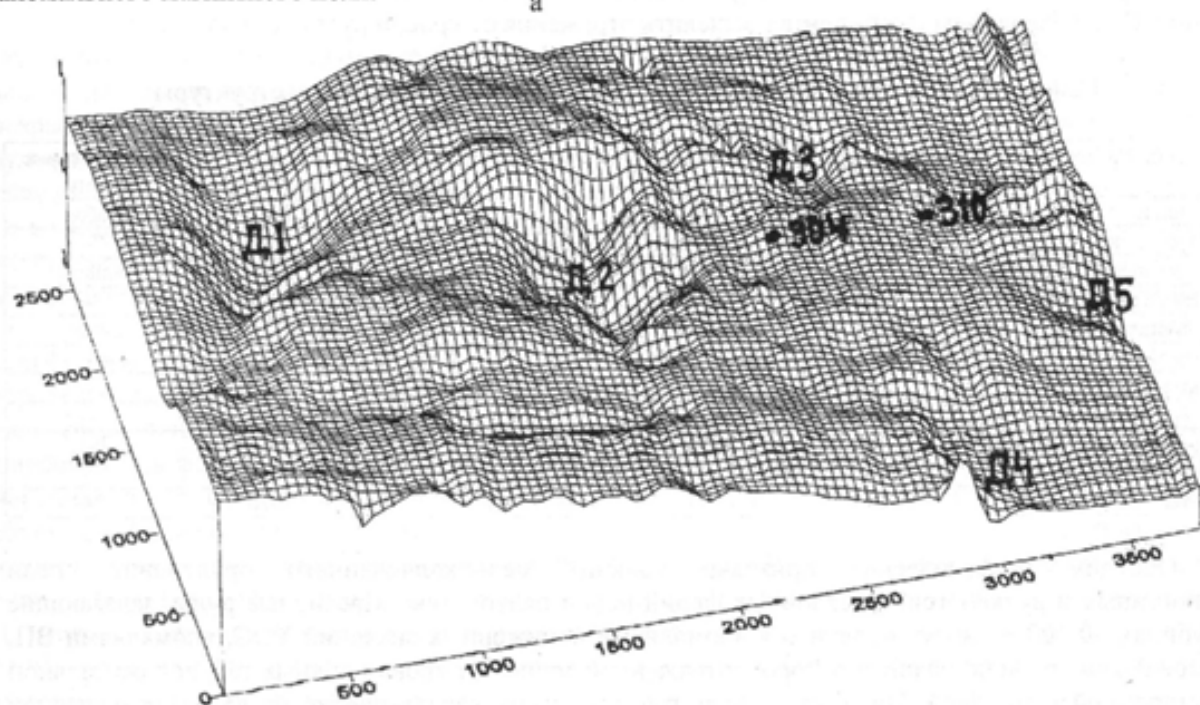
Обсудим геофизические признаки наличия медноколчеданного оруденения среди вулканогенных и вулканогенно-осадочных фаций пород палеогряды. Массивные руды, залегающие на глубинах 50-100 м, могут проявиться аномалиями пониженных значений УЭС, аномалиями ВП, расположением среди немагнитных пород, отраженной волной от кровли рудных тел, положительной гравитационной аномалией. Ни одна из этих геофизических характеристик не является присущей только колчеданным рудам. Комплекс характеристик позволит выделить в разрезе наличие рудного объекта. Но сплошное исследование колчеданосной гряды полным комплексом геофизических методов невозможно по экономическим соображениям.

Для выбора локальных прогнозных поисковых участков следует более внимательно отнестись к структурным факторам размещения колчеданных руд в пределах палеогряды. Эти факторы установлены опытом исследований колчеданных гряд в Магнитогорском, Тагильском прогибах, на Сафьяновском месторождении. К главным из них относят: приуроченность колчеданных руд к вулcano-плутоническим центрам в пределах гряды; локализацию массивных руд эксгаляционно-осадочным путем среди осадков палеодепрессий; приуроченность рудоподводящих каналов к участкам пересечения гряды долгоживущими трансформными разломами. Для выделения структурных рудоконтролирующих факторов можно использовать как известные геологические данные о строении гряды, так и материалы площадных геофизических работ, проведенных в регионе во второй половине XX века.

В качестве примера выявления структурных элементов колчеданосной палеогряды по геолого-геофизическим материалам рассмотрим участок поисковых работ размером 3,5x2,5 км, включающий в своей восточной части Шатинское рудопроявление. Поисковые площадные геофизические работы масштаба 1:5000 методами электроразведки СЭП, ВЭЗ и ВП, гравиразведки, магниторазведки проводились в 1973-1975 гг. под руководством И. Ф. Николаева. На рис. 3 приведен вариант истолкования гравитационного и магнитного полей с целью выделения структурных элементов палеогряды и выбора участков, благоприятных для локализации массивных медноколчеданных руд. Западная половина участка сложена туфами и лавами базальтов, андезит-базальтов. Падение их пологое (20-30°) западное, мощность – несколько сотен метров. Это образования трещинных или щитовых палеовулканов. В пределах западной гряды признаков колчеданного оруденения не обнаружено. В качестве геофизических признаков в 70-е годы были указаны локальные положительные гравитационные аномалии. Восточную половину участка занимают образования Шатинской палеогряды. Фрагмент ее поперечного разреза приведен на рис. 2.

Сравним проявление западной и Шатинской гряд в аномалиях геофизических методов. На рис. 3, а приведена рельефная карта локальных аномалий гравитационного поля. Между участками Д1 и Д2 локального понижения гравитационного поля (которые мы связываем с недостатком масс осадочных пород палеодепрессий) отмечается субмеридиональная полоса повышения поля. Ширина ее около 1 км. Аномалия обусловлена гравитирующим действием плотных базальтов, андезит-базальтов. В южной части гряды отмечается ступенеобразное изменение поля субширотной ориентировки Г1. Его мы можем связывать с наличием трансформного разлома, по которому южная часть гряды приподнята. На рис. 3, б видно, что разлом проявляется ступенеобразным изменением аномального магнитного поля.

а



б

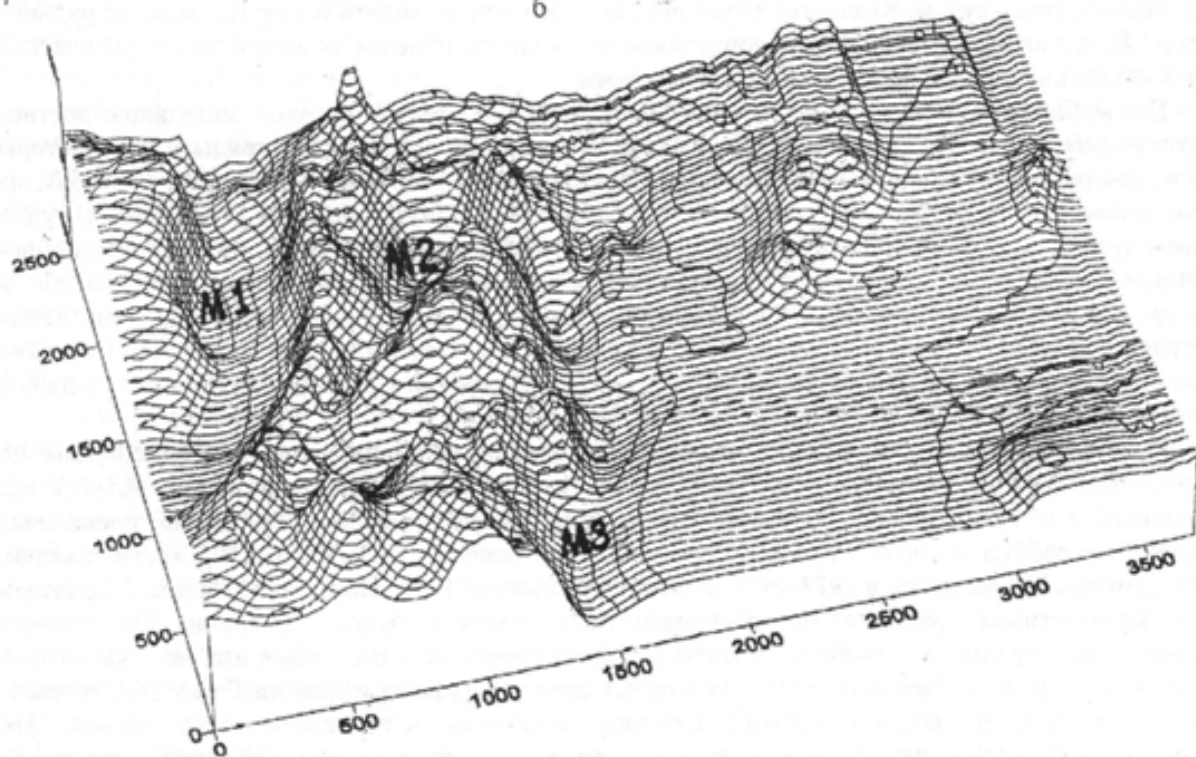


Рис. 3. Физические поля над фрагментом Сухоложской вулканической палеогряды:

А - рельефная карта аномального гравитационного поля; б - рельефная карта магнитного поля  $\Delta Z$ . Обозначения - в

тексте

Проявление Шатинской гряды в положительных аномалиях гравитационного поля менее четкое.

В пределах всего участка для прогнозирования местоположения массивных колчеданных руд интересны осадки палеодепрессий Д1-Д5. Наличие на Шатинском участке поисково-разведочных скважин, определивших мощность известняков и туфопесчаников, заполняющих межкупольные депрессии в структуре гряды, позволяет провести корреляцию между мощностью этих относительно легких ( $2,6-2,7 \text{ г/см}^3$ ) осадков и величиной отрицательных гравитационных аномалий над ними. По нашим оценкам, мощность осадков в депрессиях Д3, Д4 составляет 200, 250 м, в депрессиях Д1, Д2 – менее 100 м. Природа гравитационного минимума, который мы обозначили Д5, может быть обусловлена не только осадочными породами, но и влиянием относительно легких риолитов экструзивного купола, выделяемого здесь В. Н. Огородниковым и др. [1] (см. рис. 2, восточный фланг разреза).

Интенсивность локальных отрицательных аномалий от осадков палеодепрессий составляет 0,2-0,8 мГал. В то же время интенсивность локальных положительных гравитационных аномалий, которые могут быть обусловлены пластообразными сульфидными залежами, залегающими на глубинах более 50 м, может составлять такую же величину. И результирующее гравитационное поле может быть безаномальным, т. е. мы по гравитационному полю выделим безрудные депрессии, а рудовмещающие не заметим.

Магнитное аномальное поле над западной и восточной частями участка различное. Над южной частью Шатинской гряды поле пониженное ровное. Здесь на поверхности залегают немагнитные известняки (см. карту в работе [1]). Но и к северо-востоку от скв. 322, где распространены базальты, магнитное поле безаномальное. Базальты Шатинского участка, по исследованиям Л.Г. Бурасова, преобразованы процессами кварц-серицит-алунитового метасоматоза, что приводит к понижению их магнитной восприимчивости. Над западной грядой магнитное поле состоит из субмеридионально ориентированных положительных аномалий интенсивностью 200-600 нТл. Вероятно, базальты не преобразованы процессами околорудного метасоматоза. Однако среди базальтов западной гряды есть участки понижения магнитного поля М1-М3, для которых можно предполагать метасоматическую природу выноса магнитных компонентов.

Таким образом, анализ на поисковой площади карт магнитного и гравитационного полей позволяет выделить несколько участков, локализация в пределах которых массивных колчеданных руд представляется наиболее вероятной. Привлечение материалов электроразведочных работ методами ВП, СЭП, ВЭЗ позволит выбрать участок, содержащий максимальное количество геологических и геофизических признаков медноколчеданного оруденения.

#### БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. **Геологические маршруты** по Сухоложскому и Каменскому полигонам: Учебное пособие / Огородников В.Н., Поленов Ю.А., Сазонов В.Н. и др. Екатеринбург: Изд-во УГГА, 2002. 296 с.
2. **Пучков В.Н., Иванов К.С., Коровко А.В.** О возрасте вулканогенных формаций и времени заложения островной дуги на востоке Среднего Урала // ДАН СССР. 1990. Т. 315, № 5. С. 1203-1205.
3. **Язева Р.Г., Малошаг В.П., Бочкарев В.В.** Геология Сафьяновского колчеданного месторождения (Средний Урал). Екатеринбург, 1992. 71 с. (Препринт / УрО РАН).
4. **Ярош А.Я., Поляков А.Б.** Поиски и разведка медноколчеданных месторождений на Урале гравитационным методом. М.: ГНТИ, 1963. 131 с.