

УДК 553.435(470.55/57)

ГАЙСКОЕ МЕДНОКОЛЧЕДАННОЕ МЕСТОРОЖДЕНИЕ: СТРУКТУРА, ЗОНАЛЬНОСТЬ И РАСПРЕДЕЛЕНИЕ ЗОЛОТА И СЕРЕБРА В РУДАХ

© 2009 г. И. Б. Серавкин, В. Н. Скуратов

*Институт геологии Уфимского НЦ РАН
450000 Республика Башкортостан, Уфа, ул. Карла Маркса, 16/2
E-mail: seravkin@anrb.ru*

Поступила в редакцию 29.09.2008 г.

Современная структура Гайского месторождения определяется надвигом, по которому рудовмещающая андезидацит-риодацит-дацитовая вулканическая постройка сорвана с базальтового основания и перемещена с востока на запад. В всячем крыле надвиг сопровождается серией взбросов, расчленивших рудоносные породы на блоки. Формирование структуры месторождения происходило в 3 этапа: I и II этапы сопровождались рудообразованием, III этап – преобразованием рудных тел. Зональность в распределении Cu, Zn, Au и Ag в рудах рассмотрена авторами по серии разрезов, пересекающих всё рудное поле, построенных по данным опробования сотрудниками Гайского ГОКа. Установлена зональность нескольких типов. На I этапе рудообразования: 1) вертикальная по мощности, заключающаяся в смене снизу вверх пиритовых руд – халькопирит-пиритовыми и халькопирит-сфалерит-пиритовыми, одноактная и ритмичная (стратиформная); 2) латеральная, заключающаяся в смене указанных типов руд к флангам рудных тел; 3) латеральная с обратным порядком смены типов руд, характерная для рудоподводящих каналов. На II этапе: 4) обогащение крутопадающих рудных тел по восстанию цветными и благородными металлами. На III этапе преобразования месторождения: 5) формирование оторочек борнитовой ассоциации. Эмпирические данные и построение сплайн-моделей позволили установить бимодальное распределение Au в рудах, выраженное в концентрации его в ранних – пиритовой и пирит-халькопиритовой ассоциациях и наиболее поздних – полиметаллической и борнитовой ассоциациях. Содержания Ag последовательно возрастали от ранних к поздним стадиям рудообразования.

Ключевые слова: *месторождение, колчеданные руды, зональность оруденения, пирит, халькопирит, сфалерит, золото, серебро, сплайн-модели.*

Гайское медноколчеданное месторождение по запасам руды (473.4 млн. т) и меди является самым крупным в мире среди колчеданных месторождений вулканической ассоциации. Кроме того, содержания золота в сульфидных рудах позволяют считать Гайское месторождение сверхкрупным золото-содержащим объектом.

Со времени открытия Гайского месторождения в 1949 г., за более чем полувековой период, оно было всесторонне изучено. Уже его первооткрывателями и первыми исследователями И.В. Ленным, М.С. Недожиным, И.Л. Рудницким, Н.А. Сибирской, В.И. Скрипилем была выяснена антиклинальная структура рудного поля, проведено расчленение рудовмещающих и надрудных вулканогенных толщ, отнесённых к баймак-бурибаевской свите нижнего девона, выделена рудовмещающая куполовидная вулканическая постройка, усложненная складчатостью, установлены основные закономерности размещения рудных тел [19, 20]. Позднее, в результате комплексных исследований, выполненных коллективом сотрудников ЦНИГРИ под руководством М.Б. Бородаевской, была предложена иная интерпретация палеовулканической структуры рудного поля, изучены структура месторождения,

вещественный состав и зональность рудных тел. По данным сотрудников ЦНИГРИ, “Рудовмещающая структура Гайского месторождения представлена меридионально вытянутой деформированной вулкано-тектонической депрессией, выполненной последовательно наложенными экструзивно-эффузивно-пирокластическими продуктами центральных извержений базальт-андезит-дацит-липаритовой формации (D_{2e})” [1, 3]. Основанием рудоносной депрессии, по тем же данным, служила кремнисто-глинистая и туфогенная слоистая толща (D₁?), вскрытая рядом скважин (№№ 2018, 3000, 1881, С-1 и др.) под рудовмещающей формацией. В.С. Требухиным [21] проведен детальный литолого-фациальный анализ рудовмещающих пород и выяснена история развития Гайской палеовулканической постройки, а также других палеовулканов Гайского района [2]. Было установлено, что рудные тела первоначально формировались в близгоризонтальном положении, о чём свидетельствуют: их пластообразная и линзовидная форма, согласное с напластованием залегание, присутствие в кровле рудных тел кремнисто-туфогенных пород и рудокластов, а также слоистые текстуры руд, полосовидно-зональный харак-

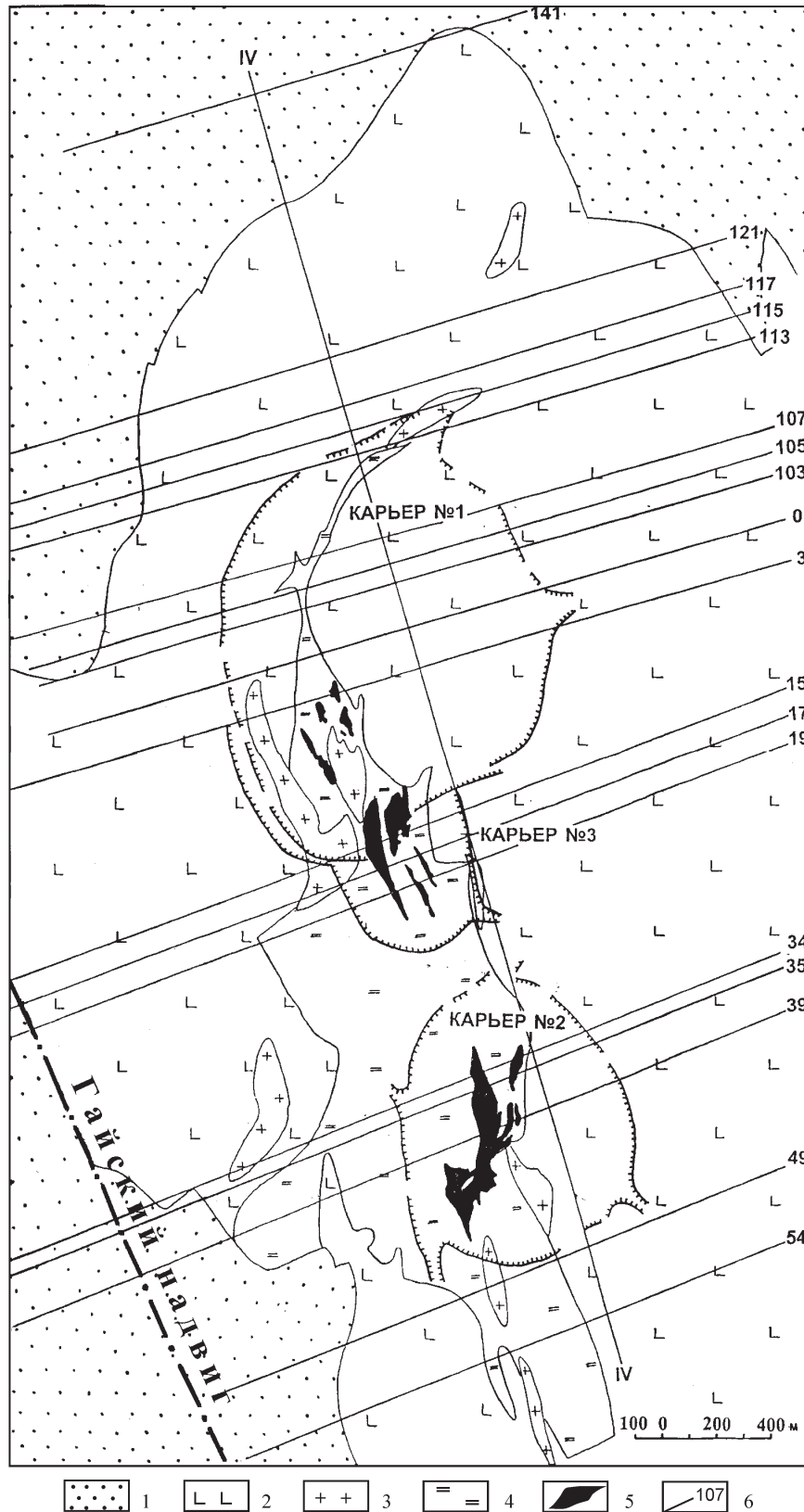


Рис. 1. Схематическая геологическая карта Гайского месторождения (по данным Гайского ГОКа).

1 – вулканомиктовые отложения улутауской свиты (D_{2zv} ul); 2 – андезит-базальтовая (4-я) и вулканогенно-осадочная (3-я) толщи (нерасчленённые) ирендыкской свиты (D_1 - D_2 e ir); 3 – субвулканические и экструзивные тела кварцевых риодацитов; 4 – метасоматиты по породам рудовмещающей толщи; 5 – колчеданные рудные тела; 6 – геологические разрезы и их номера.

тер распределения полезных компонентов (меди и цинка) и ориентировка вектора наибольшей изменчивости их содержаний, направленная снизу вверх по нормали к мощности рудных тел. Выделено 3 основных литолого-стратиграфических уровня развития и формирования промышленного оруденения, приуроченных к породам, завершающим циклы вулканизма: 1) нижний андезидацитовый, 2) средний риолито-дацитовый и 3) верхний дацитовый [3, 13]. Тот факт, что рудные тела нижнего и среднего уровня круто наклонены к востоку, а кровля рудных тел верхнего уровня залегает близгоризонтально (“Стержневая” линза), объясняется последовательным проседанием основания депрессии. Предполагается также неоднократное переотложение полезных компонентов руд, как в процессе их формирования в близгоризонтальном положении (снизу вверх вкост мощности), так и после синвулканических деформаций, в круто наклонном положении, что значительно усложнило зональность рудных тел.

СТРУКТУРА ГАЙСКОГО РУДНОГО ПОЛЯ

По последним данным [5], разрез рудного поля слагают (снизу вверх) следующие толщи: 1) ба-

зальтовая, 2) андезит-дацит-риолитовая, 3) вулканогенно-осадочная, 4) андезит-базальтовая, 5) осадочная вулканомиктовая. Первые две толщи являются аналогами баймак-бурибаевской свиты (D_1b-br). Третья и четвертая толщи принадлежат ирендыкской свите ($D_1-D_2e\ ir$), а пятая – улутауской свите ($D_2zv\ ul$) (рис. 1, 2). Ранее рудовмещающая андезит-дацит-риолитовая толща подразделялась на нижнюю – андезит-дацитовую, среднюю – липарит-дацитовую и верхнюю – дацитовую части [3]. Основной объем рудных тел локализован в средней части рудоносной толщи.

Общая складчатая структура рудного поля, определяемая по залеганию контактов баймак-бурибаевской, ирендыкской и улутауской свит, представлена, как это показано ранее, вытянутой в близмеридиональном направлении брахиантиклиналью, северное и южное крылья которой погружаются соответственно к северу и югу под углом около 40° , восточное крыло – под углами $30-45^\circ$, а западное – под более пологими углами – $15-30^\circ$. В ядре брахиантиклинали рудовмещающие баймак-бурибаевские отложения образуют более напряженную линейную антиклиналь, сформированную, как предполагалось большинством исследователей, за счет вулканической постройки центрального типа.

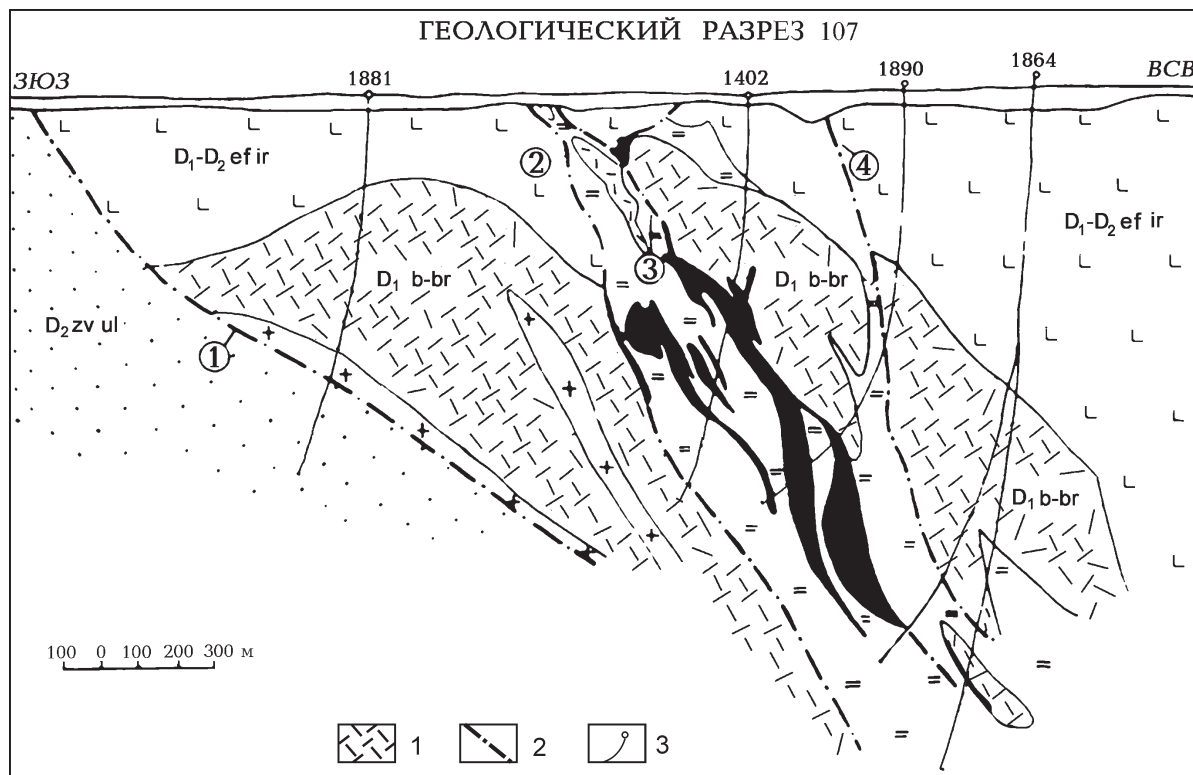


Рис. 2. Геологический разрез Гайского медноколчеданного месторождения по профилю 107 (по данным Гайского ГОКа, с упрощениями и дополнениями авторов).

1 – базальтовая (1-я) и андезит-дацит-риолитовая рудовмещающая (2-я) толщи баймак-бурибаевской свиты (D_1b-br); 2 – разломы (№ 1 – Гайский надвиг, № 2 – Западный взброс, № 3 – послыйный детачмент, № 4 – Восточный взброс); 3 – скважины. Остальные условные обозначения см. рис. 1.

Разрывная структура Гайского месторождения, по нашим данным, определяется Гайским надвигом пологого восточного падения, поверхность которого пересечена наиболее глубокими скважинами в западной части рудного поля (рис. 2), и сопряженными с надвигом субмеридиональными взбросами крутого восточного падения, расчленяющими рудное поле на ряд блоков-пластин, как это было показано и ранее [5]. В отличие от предыдущих построений, среди субмеридиональных нарушений крутого восточного падения присутствуют не только косо секущие напластование разломы (№ 2 и № 4 на рис. 1), но и послойные взбросы, а также разрывные нарушения западного падения. Основным послойным нарушением является мощная зона расланцевания, следующая вдоль кровли и, вероятно, подошвы рудных тел среднего стратиграфического уровня оруденения (№ 3 на рис. 2). Это нарушение служило ограничением (детачментом) интенсивных разрывно-складчатых деформаций, проявившихся в его всячем крыле.

В истории формирования структуры месторождения выделяется три этапа, границы между ними определяются проявлением интенсивных деформаций. На первом этапе происходило накопление вулканогенных толщ рудовмещающей баймакбурибаевской свиты – базальтовой и андезит-дацитриолитовой, завершившееся синвулканическими деформациями, в результате которых эти толщ приобрели крутое восточное падение. На втором этапе формировались толщ ирендыкской и улутауской свит. Вулканогенно-осадочная и андезит-базальтовая толщ ирендыкской свиты перекрыли деформированную рудоносную вулканическую постройку и залегают на подстилающих отложениях несогласно. Особенно резкие угловые несогласия отмечаются в северной части месторождения, где вулканогенно-осадочная толщ выполняет локальную депрессию возможно кальдерного типа (рис. 2). Третий, поствулканический, этап формирования структуры наступил после накопления улутауской свиты и был связан, главным образом, с образованием надвига. Как видно на рис. 2, кососекущие и послойные разрывные нарушения, сопряженные с надвигом в его всячем крыле, нарушают рудоносные и надрудные толщ. Особенно интенсивные деформации проявлены в зоне расланцевания, сформировавшейся по околорудным метасоматитам (между нарушениями №№ 2 и 3 на рис. 2).

В.С. Нестеренко [5, 9, 10], в течение многих лет изучая строение и состав месторождения в горных выработках, убедительно показал важную роль поствулканических тектонических деформаций в формировании структуры месторождения, изменении формы рудных тел, перераспределении рудного вещества и усложнении их первоначальной зональности. По его данным, поствулканическая структура месторождения сформировалась в результате над-

виговых и взбросо-сдвиговых перемещений. Наиболее интенсивные перемещения осуществлялись по круто падающим к востоку взбросо-сдвигам в пределах рудной зоны и привели к деформациям и расчленению на блоки рудной зоны и отдельных рудных тел, разлинзованию рудных тел, которое сопровождалось формированием новых рудных ассоциаций (барит-сфалерит-галенитовой и борнитсодержащих), пластическим течением и перекристаллизацией сульфидов.

Ключевой проблемой в понимании происхождения современной структуры Гайского рудного поля является определение возраста и стратиграфической принадлежности осадочной вулканомиктовой толщ, подстилающей рудовмещающие вулканисты. В.Т. Тищенко, проводивший в 1978 г. геологическое картирование района и М.Б. Бородаевская и её соавторы [3] считали эту толщ нижедевонской (?), лежащей в разрезе и подстилающей рудовмещающую формацию. Позднее было высказано мнение о принадлежности вулканомиктовой толщ к улутауской свите, на которую надвинут рудовмещающий комплекс. Ю.А. Бельковым и Н.И. Золотаревым по геолого-геофизическим данным была составлена схема геологического строения Гайского рудного района, на которой показаны основные разрывные нарушения: Репинский и Новочеркасский надвиги меридионального простирания, Гайский надвиг и Центральный взброс ССЗ простирания, ограничивающие Гайскую вулканотектоническую структуру, и меридиональный Калиновский взброс. Идентичность рассматриваемой толщ с улутауской свитой и наличие надвига подтверждено исследованиями В.С. Нестеренко, Ф.П. Буслаева и В.А. Прокина [5] и нами при просмотре керна скв. 3000, перебурившей подрудную осадочную толщ и залегающие под ней вулканогенные породы (рис. 9 в [5, с. 35]).

Таким образом, основание рудовмещающего комплекса срезано надвигом. Горизонтальная амплитуда перемещения вулканогенных толщ по надвигу с востока на запад по геологическим данным составляет более 2 км. Вероятно, она не превышает 4–5 км, так как именно на такое расстояние Гайское рудное поле смещено к северо-западу от эпицентра куполовидной кольцеобразной структуры диаметром 22–32 км, установленной Н.И. Халевиным и А.М. Виноградовым по данным пространственного сейсмического зондирования [5, с. 73]. А.М. Виноградов связывает опорный отражающий горизонт, по которому отображается куполовидное поднятие, с поверхностью магматической камеры, питавшей Гайскую вулканическую постройку, или с фронтом метаморфизма, но, возможно, этот горизонт соответствует и поверхности базальтовой (1-й) толщ, фрагменты которой встречены наиболее глубокими скважинами на северо-западном фланге Гайской брахиантиклинали. Так или иначе, но наличие

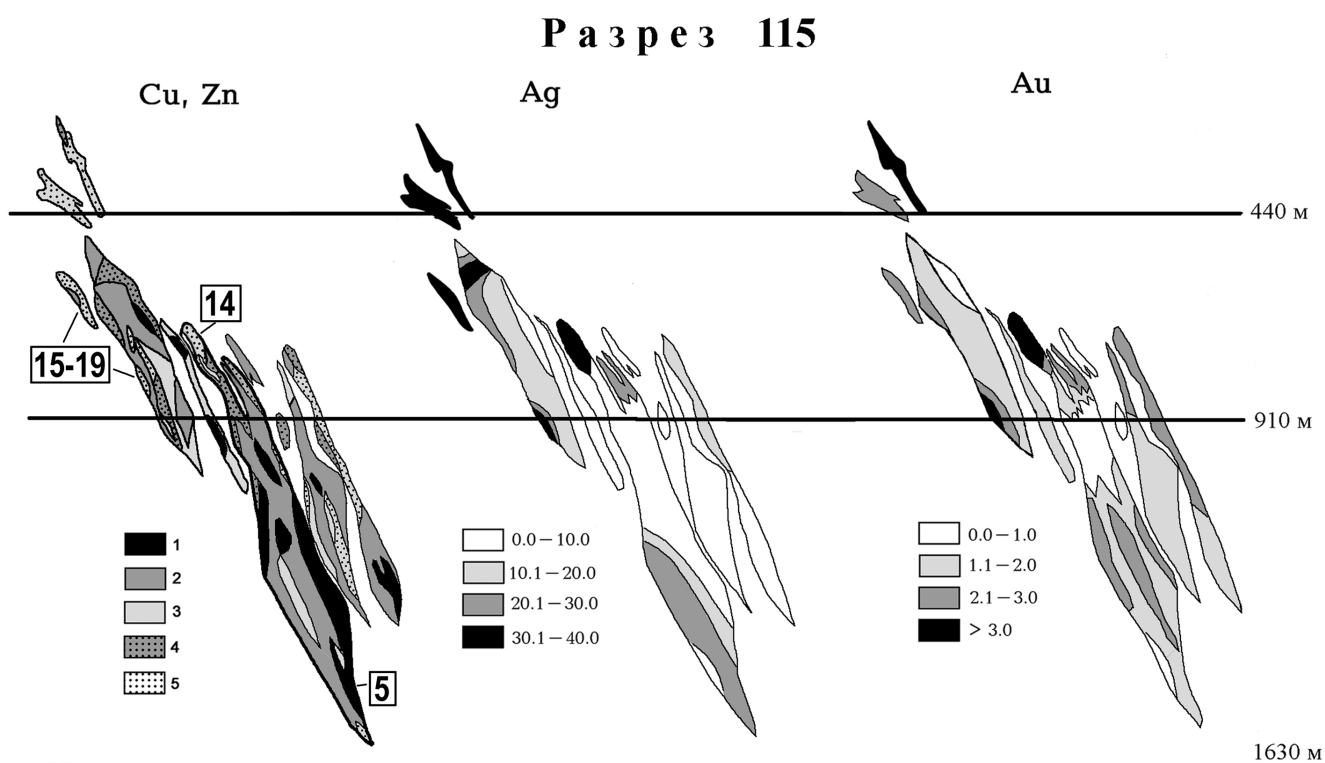


Рис. 3. Гайское медноколчеданное месторождение. Зональность рудных тел по разрезу 115.

Cu, Zn – распределение промышленных сортов руд: 1–3 – массивные сорта: 1 – серноколчеданный, 2 – медноколчеданный, 3 – медно-цинковый; 4, 5 – вкрапленные сорта: 4 – медный, 5 – медно-цинковый (по данным Гайского ГОКа). Ag, Au – распределение содержаний серебра и золота, в г/т. В квадратах и прямоугольниках – номера и названия рудных тел. Эти же условные обозначения на рис. 4–6.

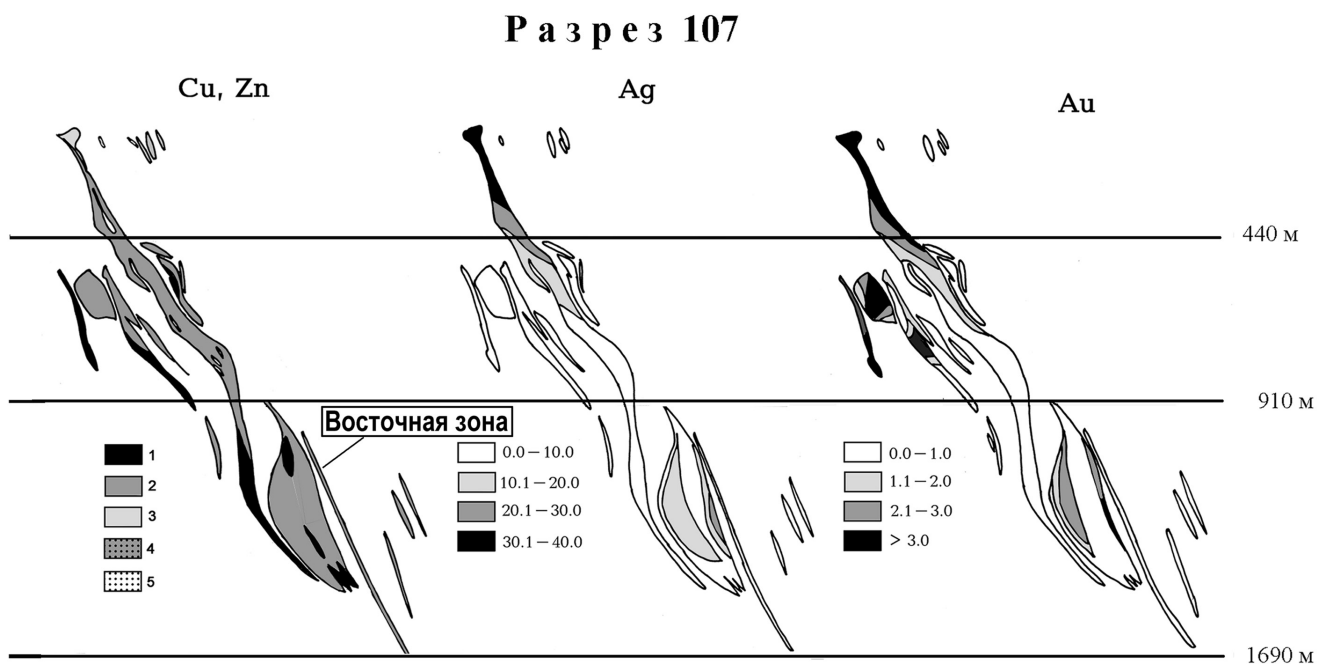


Рис. 4. Гайское медноколчеданное месторождение. Зональность рудных тел по разрезу 107.

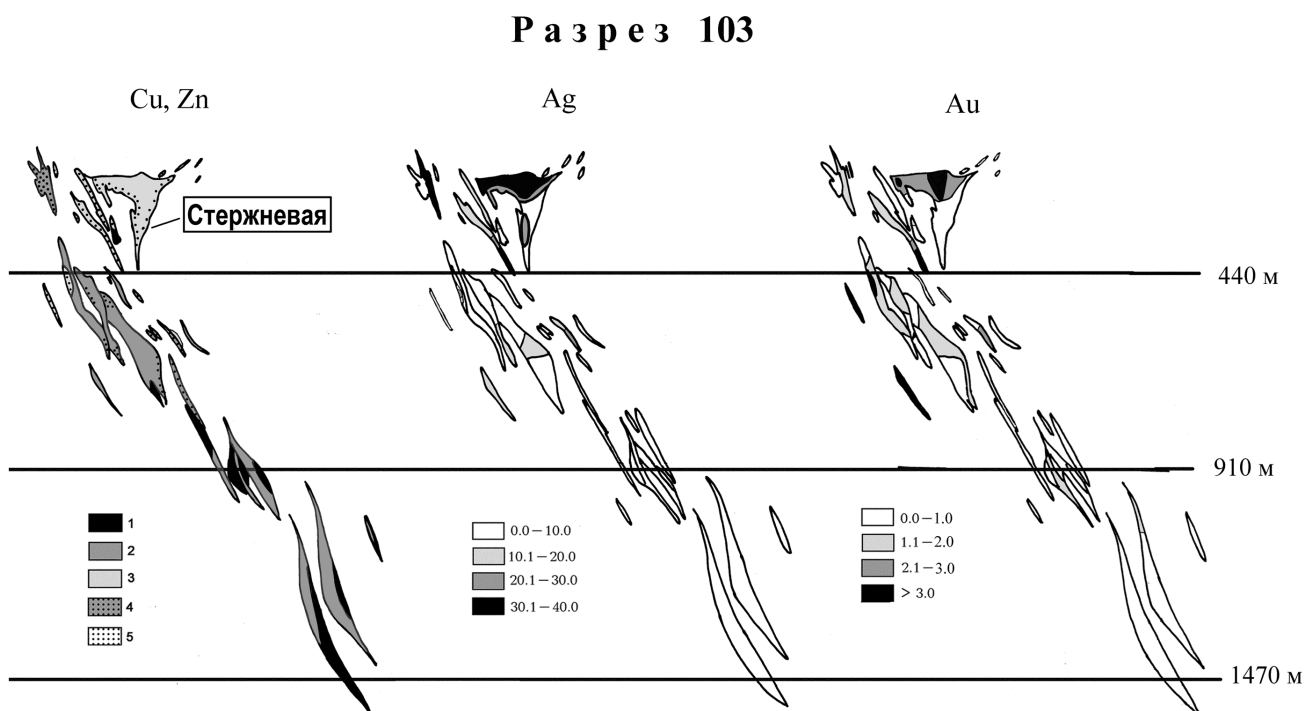


Рис. 5. Гайское медноколчеданное месторождение. Зональность рудных тел по разрезу 103.

Гайского надвига устраняет один из главных аргументов в пользу интерпретации палеовулканической структуры Гайского рудного поля, как деформированной вулcano-тектонической депрессии, так как предполагавшееся основание депрессии (кальдеры) неизвестно; вулканическая постройка перемещена со своего основания [18].

Несмотря на многолетние и многоплановые исследования, проведенные на Гайском месторождении, остаётся ещё ряд вопросов, требующих уточнения и выяснения. Это связано, во-первых, с неравномерной изученностью месторождения: наиболее детально изучалась структура и состав руд верхнего и среднего этажей Северного участка, вмещающего основные запасы руд, строение Центрального и Южного участков и глубоких горизонтов Северного участка менее изучены.

В процессе эксплуатации месторождения с 1959 г. геологами Гайского ГОКа (С.И. Кузнецов, В.С. Нестеренко, В.А. Гончаров, И.Г. Фирсов и др.) получен исключительно ценный материал о строении и составе месторождения, обобщенный в работе В.С. Нестеренко [11] и в коллективной монографии, вышедшей в 2004 г. под редакцией В.А. Прокина [5]. По материалам ГОКа уточнена зональность месторождения и конкретных рудных тел. По простиранию месторождения выделяются 3 участка ("залежи", объединяющие сконцентрированные в пространстве группы рудных тел): Северный, Средний и Южный (рис. 1). Средний участок (интервал профилей №№ 2–29), вмещающий преимущественно серноколчеданные руды, является центром общей симметрии месторождения. К югу и северу от него по простиранию размещаются руды разнообразного, преимущественно медноколчеданного состава. Основные запасы руд сосредоточены на Северном участке, где рудные тела группируются на 3-х этажах (по падению системы рудных тел) (рис. 3–5): верхнем (120–400 м, "Стержневая" линза, рис. 5), среднем (450–750 м, рудные тела №№ 15–19, рис. 3) и нижнем (900–1500 м, рудные тела "Восточной" зоны, рис. 4). Такое разделение условно, т.к. некоторые рудные тела непрерывно прослеживаются с верхнего до нижнего горизонта вдоль определенного стратиграфического уровня, например, рудные тела № 14 и № 5, составляющие общее пластообразно-линзовидное тело. Тем не менее, установлена общая вертикальная зональность в изменении состава оруденения, заключающаяся в разных соотношениях минеральных типов руд, а также массивных и вкрапленных руд: на нижнем этапе объемы Cu-Zn-колчеданных, Cu-колчеданных и S-колчеданных руд относятся как 1 : 5 : 5, на верхнем этапе серноколчеданные руды почти отсутствуют, а соотношение медноколчеданных и медноцинковым рудам составляет 1 : 3. Снизу вверх возрастает доля вкрапленных руд: соотношения массивных и вкрапленных руд меняются от 20 : 1 на нижнем этапе через 7 : 1 – на среднем и до 2 : 1 – на верхнем. На фоне общей вертикальной (в современной структуре) минералого-геохимической зональности в отдельных рудных телах установлена как

преимущественно серноколчеданные руды, является центром общей симметрии месторождения. К югу и северу от него по простиранию размещаются руды разнообразного, преимущественно медноколчеданного состава. Основные запасы руд сосредоточены на Северном участке, где рудные тела группируются на 3-х этажах (по падению системы рудных тел) (рис. 3–5): верхнем (120–400 м, "Стержневая" линза, рис. 5), среднем (450–750 м, рудные тела №№ 15–19, рис. 3) и нижнем (900–1500 м, рудные тела "Восточной" зоны, рис. 4). Такое разделение условно, т.к. некоторые рудные тела непрерывно прослеживаются с верхнего до нижнего горизонта вдоль определенного стратиграфического уровня, например, рудные тела № 14 и № 5, составляющие общее пластообразно-линзовидное тело. Тем не менее, установлена общая вертикальная зональность в изменении состава оруденения, заключающаяся в разных соотношениях минеральных типов руд, а также массивных и вкрапленных руд: на нижнем этапе объемы Cu-Zn-колчеданных, Cu-колчеданных и S-колчеданных руд относятся как 1 : 5 : 5, на верхнем этапе серноколчеданные руды почти отсутствуют, а соотношение медноколчеданных и медноцинковым рудам составляет 1 : 3. Снизу вверх возрастает доля вкрапленных руд: соотношения массивных и вкрапленных руд меняются от 20 : 1 на нижнем этапе через 7 : 1 – на среднем и до 2 : 1 – на верхнем. На фоне общей вертикальной (в современной структуре) минералого-геохимической зональности в отдельных рудных телах установлена как

нормальная по мощности, так и латеральная по падению и простиранию зональность в распределении минеральных типов и сортов руд. Пожалуй, наиболее отчетливо и однозначно проявлена латеральная зональность, выраженная в обогащении выклинивающихся частей рудных тел массивными и вкрапленными медно-цинковыми рудами. Нормальная по мощности зональность имеет как прямой (возрастание от подошвы к кровле содержания меди и далее цинка), так и обратный типы, а часто, как отмечалось выше, слоистую структуру. Авторы коллективной монографии связывают обратную зональность с перераспределением вещества вблизи разломов, но нам представляется, что это, как и сложная стратиформная зональность многих рудных тел, результат ритмичного рудоотложения, что было показано Ю.В. Никешиним [13].

МИНЕРАЛЬНЫЙ СОСТАВ И СТРУКТУРНО-ТЕКСТУРНЫЕ ОСОБЕННОСТИ РУД

Минералогия рудных тел, их структурные особенности изучались Н.В. Петровской [14], Г.Н. Пшеничным [15, 16], Ф.П. Буслаевым и В.П. Молошагом [5]. Установлены главные (пирит, халькопирит, сфалерит, блеклая руда, борнит), второстепенные (галенит, халькозин, марказит), редкие и акцессорные рудные минералы, с помощью микрозонда определен их химический состав [5, стр. 43–51].

Наряду с известными, по данным предыдущих исследователей, редкими минералами – золотом, серебром, аргентитом, алтаитом, гесситом, креннеритом, германитом, лоусонитом, станноидитом, дигенитом, магнетитом и ильменитом определены бетехтинит, сульфотеллурид серебра, теллуросвисмутит и арсенипирит. В.П. Молошагом выполнен парагенетический анализ руд, выделены 3 парагенезиса (рудные фации): 1) сульфидно-гематитовый, 2) халькопиритовый и 3) борнитовый, формировавшиеся, соответственно, при температурах 306–326, 280–450 и 270–360°C. Определены минеральные типы массивных руд (пиритовый, халькопирит-сфалерит-пиритовый, сфалерит-пиритовый, борнит-халькопирит-пиритовый и борнит-халькопирит-сфалерит-пиритовый) и соответствующие типы вкрапленных руд.

Авторами настоящей статьи в процессе работ 2003–2005 гг. в рудах Гайского месторождения выявлены фрагменты слоистых текстур. Они характеризуются чередованием слоёв рудного и нерудного материала, его градиционной сортировкой, проседанием тонкого материала под крупными обломками. Под микроскопом в рудных прослоях видно срезаение элементов зональности зерен пирита. В подчинённых количествах по отношению к зернам пирита присутствуют халькопирит, сфалерит, галенит, гематит, теллуриды благородных металлов и иногда борнит. Характерной особенностью надрудных просло-

ев является наличие сортированных по размеру зерен кварца, залегающих в массе тонкозернистого слюдистого материала. Всё это несомненно свидетельствует о проявлении вулканогенно-осадочного рудоотложения при формировании рудных тел.

Минераграфическое изучение руд В.Н. Скуратовым подтвердило данные предшествующих исследователей о приуроченности теллуридов благородных металлов преимущественно к сфалерит-халькопирит-пиритовой минеральной парагенетической ассоциации.

Минералогия золота и серебра в рудах Гайского месторождения изучалась Н.В. Петровской [14], Г.Н. Пшеничным и Н.Г. Рыкус [15, 17], Ф.П. Буслаевым и В.П. Молошагом [5], распределением золота в рудах верхнего структурного этажа Северного участка занимался В.С. Нестеренко. Основные результаты исследований следующие: а) золото и серебро содержатся во всех типах руд Гайского месторождения в количествах, в целом, превышающих содержания этих металлов в рудах большинства других месторождений Уральского типа (на Южном Урале); б) средние содержания благородных металлов и величина отношения Ag/Au возрастают от серноколчеданных руд к медноколчеданным и медно-цинково-колчеданным; в) около половины всего золота и часть серебра месторождения находятся в виде собственных минеральных форм, главным образом, самородного золота и серебра, а также электрума, гессита, аргентита, креннерита, калаверита; остальное золото и большая часть серебра представлены тонкодисперсными и изоморфными примесями в сульфидах [17]; г) самородное золото преимущественно встречается в ассоциации с галенитом, теннантитом, борнитом, халькопиритом и сфалеритом; размеры выделений золота увеличиваются по направлению от нижних к верхним этажам месторождения, наиболее крупные золотины (размером до 5 мм) встречались в баритовых гнездах среди борнитсодержащих руд; пробность золота варьирует от 691 до 902 [5]; д) на верхнем структурном этаже большая часть золота (60–70%) находится в виде тонкодисперсной примеси в пирите, халькопирите, сфалерите и других сульфидах; руды, содержащие борнит, теннантит, галенит, отличаются большим колебанием содержания золота (от 1 до 20 г/т) и его повышенными количествами (до нескольких десятков граммов на тонну); содержания золота и серебра увеличиваются с повышением содержания галенита, теллуридов и теннантита; крупные зерна золота тяготеют к выклинкам и пережимам рудных тел [12].

Н.В. Петровской в рудах Гайского месторождения выделены разновозрастные минеральные ассоциации: 1) ранние: пирит-халькопиритовая и пирит-халькопирит-сфалеритовая и 2) поздние, с борнитом и люминесцирующим сфалеритом, германий- и оловосодержащими сульфидами.

И.Г. Фирсовым и Д.И. Галихановой в 1992–95 гг. получены данные о распределении золота в рудах и боковых породах средних и глубоких горизонтов месторождения [22]. Выяснены содержания золота в различных сортах руд, составляющие *в серноколчедане*: в 45% проб – 0.5–1.0 г/т, в остальных пробах – < 0.5 г/т; *в медном колчедане*: в 30% проб – 0.5–1.0 г/т, в 20% – 1.0–1.5 г/т, в 20% – 1.5–2.0 г/т, в 10% – 2.0–2.5 г/т, в 10% – 2.5–3.0 г/т. Сделаны следующие выводы: 1) наиболее низкие и стабильные содержания золота установлены в серноколчеданных рудах, тогда как медноколчеданные руды, имеющие в целом более высокие количества золота, отличаются весьма неравномерным его распределением; 2) концентраторами золота служат: в серноколчеданных рудах – пирит, в медноколчеданных рудах – пирит и халькопирит; 3) золото во вмещающих породах связано с вкрапленностью сульфидов, основным его концентратором является пирит, тонкодисперсное золото в нём находится в виде включений размером в тысячные, до сотысячных долей мм; 4) во вмещающих породах установлена тесная геохимическая связь золота с барием, серебром, свинцом и цинком, устойчивая связь – со свинцом, серебром, мышьяком, слабая – с цинком, мышьяком и медью; с другими элементами связь отсутствует.

В.П. Молошаг и В.В. Мурзин [8], в результате исследований в 1980-х годах, пришли к следующим выводам: 1) основная масса выделений самородного золота приурочена к блеклым рудам и галениту; 2) теллуриды золота присутствуют в сростках со всеми минералами, кроме борнита, в борнитовых рудах они не встречаются; 3) основная масса серебра рассеяна в виде изоморфной примеси в борните, блеклых рудах, галените и дигените; такие минералы, как бетехтинит, гессит, кроннерит, штрмейерит, самородное серебро, крайне редки и не играют заметной роли в распределении серебра в рудах; 4) минералогия золота и серебра вкрапленных руд идентична выясненной для сплошных руд.

РАСПРЕДЕЛЕНИЕ ЗОЛОТА И СЕРЕБРА

Распределения благородных металлов в рудах нами изучалось в разрезах всех трех участков месторождения: Северного – по профилям 115, 107 и 103; Центрального – по профилям 15, 17 и 19 и Южного – по профилю 39 (рис. 1, 3–8.). Для всех рудных тел, кроме 5-14 использованы данные рядового опробования Гайского ГОКа на Cu, Zn, S, Ag и Au; для рудного тела 5-14 – данные определения цветных, благородных металлов и редких элементов по рядовым и групповым пробам.

В разрезе 115 (рис. 3), демонстрирующем наибольшие мощности рудных тел в пределах среднего (440–910 м) и глубоких (глубже 910 м) горизонтов месторождения, выявлены следующие особен-

ности распределения сортов руд и благородных металлов, наиболее отчетливо проявленные в рудном теле 5-14 (рис. 4):

1. Отсутствие корреляции между сортами руд и концентрациями благородных металлов. Так, в нижней половине рудного тела достаточно высокие содержания золота (2.1–3.0 г/т) отмечаются как в медноколчеданных, так и в серноколчеданных рудах и, напротив, те же руды центральной части линзы относительно обеднены и золотом (до 1 г/т) и серебром (до 10 г/т).

2. Симметричная латеральная зональность, по золоту и серебру, проявленная на глубоких горизонтах рудного тела 5-14, заключающаяся в заметном увеличении содержаний обоих металлов к выклинкам по падению и восстанию, что привело к обеднению руд золотом в интервале 900–1050 м и серебром – в интервале 900–1150 м.

3. Вертикальная зональность в распределении концентраций как цветных (Cu, Zn), так и благородных (Ag, Au) металлов. В наиболее мощных рудных телах, залегающих на средних и глубоких горизонтах месторождения, максимальные содержания серебра и золота находятся в подошве, а минимальные – в кровле рудных тел. Наряду с вертикальной, локально проявлена зональность стратиформного типа по Cu, Zn, Au, хорошо выраженная в линзовидной части рудного тела 5-14 на глубоких горизонтах. Стратиформная зональность является усложненным вариантом простой (одноактной) вертикальной зональности, связанной с циклическим проявлением вулканогенно-осадочного рудообразования.

4. Резкое обогащение золотом и серебром верхних выклинок рудных тел, что отчетливо проявляется на среднем и верхнем горизонтах месторождения по сечению профиля 115.

В разрезе 107 (рис. 4) проявлены те же закономерности распределения Ag и Au, что и в вышеописанном сечении. В этом разрезе тела нижнего и среднего структурных уровней, выклинивающиеся по простиранию к югу, имеют меньшую мощность, чем в разрезе 115 и в них отчетливо проявлена лишь асимметричная зональность в распределении серебра и золота, выраженная в увеличении их содержаний в направлении восстания рудных тел. Особенно отчетливо эта зональность проявлена в рудном теле 5-14, имеющем в этом сечении протяженную пластообразную форму (рис. 4). В рудном теле Восточной зоны, локализованном глубже горизонта 910 м, проявлена зональность стратиформного типа: золотом и серебром обогащены подошва и кровля линзы. Как и в профиле 115, в рассматриваемом сечении наблюдается явное несоответствие зональности по цветным металлам с зональностью по золоту и серебру (рис. 4).

Разрез 103 (рис. 5) иллюстрирует выклинки рудных тел среднего и нижних горизонтов месторождения

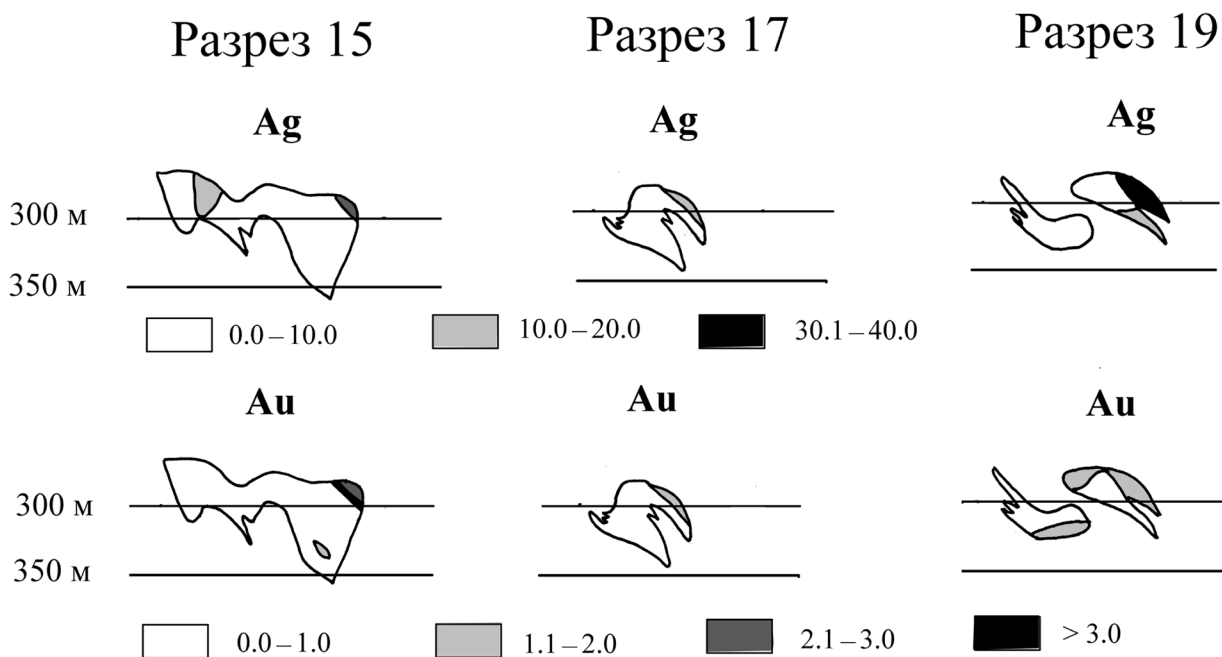


Рис. 6. Распределение золота и серебра в серноколчеданных рудах Центрального участка (карьер № 3) Гайского месторождения.

дения. Рудное тело верхнего горизонта (Стержневая линза) пересечено в его средней (по простиранию) части. Выклинки рудных тел среднего и нижнего горизонтов имеют в основном низкие содержания серебра и золота, несколько повышающиеся во вкрапленных рудах в основном нижнего стратиграфического уровня. Зональность Стержневой линзы, представленной в этом сечении медно-цинковыми рудами, заключается в обогащении золотом и серебром верхней, полого залегающей части рудного тела. Максимальные содержания золота (>3.0 г/т) приурочены к субвертикальной зоне, продолжающей по восстанию крутопадающую часть Стержневой линзы. Последняя фиксирует рудоподводящий «канал», ориентированный перпендикулярно к кровле рудного тела, залегающей согласно с надрудными породами. Ранее (1963 г.) минералогическое картирование Стержневой линзы было выполнено Е.П. Мироновым и Л.В. Касьяновым, ими в этом рудном теле выделены халькопирит-пиритовые, сфалерит-халькопирит-пиритовые, борнит-халькопирит-пиритовые и борнит-сфалерит-халькопирит-пиритовые минеральные типы руд, каждый из которых подразделен на подтипы по содержанию ведущего минерала. Объемное распределение этих типов в Стержневой линзе заключается в следующем: наиболее бедные халькопирит-пиритовые руды образуют центральные «ядра», которые обрамлены богатыми медными рудами; сфалерит-халькопирит-пиритовые руды залегают в виде линз на границе бедных и богатых руд, а руды с борнитом развиты, как правило, на периферии сплошных богатых медных руд и обрамлены вкрапленными рудами. Изу-

ченная нами зональность по разрезу 103 относится к сечению через медно-цинковую часть рудного тела. Закономерности распределения **Ag** и **Au** в рудах Стержневой линзы, по данным Е.П. Миронова и Л.В. Касьянова, заключаются в следующем: 1) в рудах без борнита содержания **Ag** и **Au** закономерно возрастают с увеличением содержаний меди и цинка; 2) в рудах с борнитом содержания золота зависят от количества меди, а серебра – от содержания цинка; 3) в целом, содержания золота являются невысокими (2.0–3.0 г/т), достигая максимума в богатых сплошных борнитовых рудах (5.5–8.0 г/т) и медно-цинковых вкрапленных рудах (10.86 г/т).

Разрезы Центрального участка – 15, 17, 19, (рис. 6) дают представление о золотоносности и содержаниях серебра в серноколчеданных рудах «центра симметрии» месторождения. Развитые здесь серноколчеданные тела в основном содержат менее 1.0 г/т золота и менее 10.0 г/т серебра, содержания которых повышаются местами в кровле залежи и в кровле и подошве на юго-восточной выклике рудного тела (рис. 6, разрез 19).

Разрез 39 (рис. 7) иллюстрирует зональность рудных тел Южного участка месторождения, отработанных карьером № 2 (рис. 1). Форма Южно-Гайской залежи напоминает Стержневую линзу, близким является и распределение благородных металлов, повышенные содержания которых приурочены к медно-цинковым рудам и возрастают к осевой зоне рудного тела.

Суммируя данные о распределении меди, цинка, золота и серебра в рудах Гайского месторождения на всем его протяжении, можно констатиро-

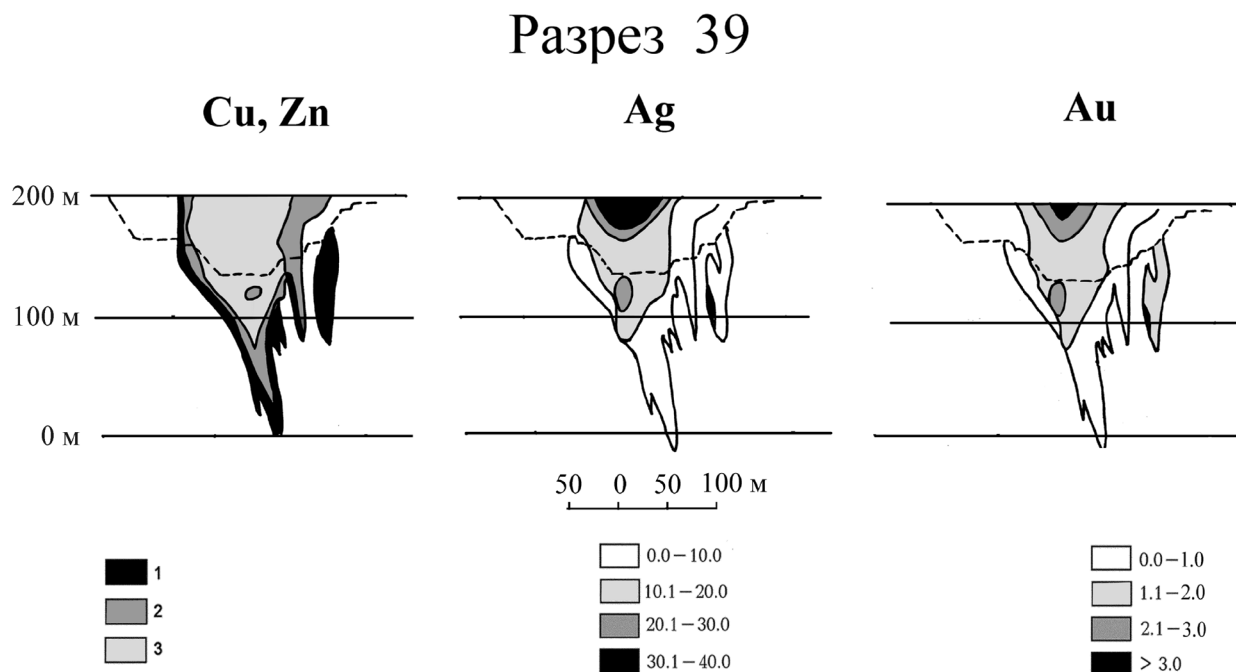


Рис. 7. Гайское месторождение. Зональность рудных тел Южного участка (5-я залежь, карьер № 2). Cu, Zn – распределение промышленных сортов руд: 1 – серноколчеданные, 2 – медноколчеданные, 3 – медно-цинковые руды; Ag, Au – распределение содержаний серебра и золота, в г/т.

вать, что, несмотря на достаточно сложное распределение цветных и благородных металлов, выявляется ряд вполне определённых закономерностей их размещения в рудах. Установлено несколько типов зональности по золоту и серебру, проявившихся как в отдельных рудных телах, так и в целом по месторождению.

1. Общая зональность рудного поля заключается в смене серноколчеданных руд Центрального участка медными и медно-цинковыми рудами в направлениях к ССЗ и ЮЮВ и параллельном обогащении руд благородными металлами.

2. В отдельных рудных телах, преимущественно в “раздувах” их мощности, проявлена зональность латерального, вертикального (по нормали к мощности рудного тела) и стратиформного типов. Первая в одних случаях выражена в симметричном обогащении флангов рудных линз и пластообразных тел цинком, золотом и серебром, в других – максимальном обогащении центральных частей рудных тел золотом и серебром и уменьшении их содержаний к периферии, что характерно для мощных коротких линз, штокообразных и конусообразных рудных тел (рудные тела среднего горизонта в разрезе 115 (по серебру), разрезе 107 (по золоту), Стержневая линза в разрезе 103, рудное тело Южного участка в разрезе 39). Этот подтип латеральной зональности фиксирует, вероятно, положения рудоподводящих каналов. Зональность вертикального (по нормали к мощности) и стратиформного типов заключается в простом или “многоэтажном” (слоистом) распределении благородных металлов по мощности колчеданных тел, с

убыванием их содержаний от подошвы к кровле рудного тела, реже – в обратном направлении.

3. Вертикальный (по нормали к стратиграфическим уровням оруденения) тип зональности проявляется и в отношении общей системы линз Северного участка, в котором рудные тела нижних стратиграфических уровней богаче благородными металлами.

4. В северной части месторождения, наряду с отмеченными типами зональности, проявлена асимметричная вертикальная зональность, выраженная в обогащении большинства рудных тел на выклинках по восстанию золотом и серебром.

По-видимому, можно предполагать, что симметричная латеральная зональность и зональность стратиформного типа, вектор которой направлен по нормали к мощности рудных тел, являются зональностью отложения руд комбинированным гидротермально-метасоматическим и гидротермально-осадочным способом, при субгоризонтальном положении рудовмещающих пород; вертикальная асимметричная зональность, как это трактовалось и ранее, была сформирована после деформаций рудовмещающей толщи и приобретения рудными телами нижнего и среднего стратиграфических уровней крутого восточного падения.

МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ

Для математического моделирования, проведенного с целью выяснения корреляционных связей между рудообразующими элементами, использова-

Таблица 1. Узловые точки математического моделирования методом МОНС

№№ узловых точек	Элементы-факторы												
	%			г/т									
	Cu	Zn	S	Ag	Au	Se	Te	Cd	In	Co	Ga	Tl	Ge
1	0.1	0.1	5.0	1.5	0.2	2.0	2.0	5.0	0.5	2.0	1.0	1.0	1.0
2	1.1	1.0	20.0	20.0	1.0	10.0	10.0	20.0	1.5	50.0	6.0	4.0	2.0
3	2.1	2.0	35.0	40.0	2.0	30.0	20.0	100.0	2.5	150.0	10.0	7.0	3.0
4	4.0	4.0	40.0	60.1	5.0	40.0	50.0	240.0	4.0	300.0	20.0	10.0	4.0
5	9.0	9.0	51.0	107.1	7.0	90.0	70.0	400.0	7.0	400.0	40.0	18.0	7.0

Примечание. При моделировании влияния элементов-факторов на концентрации серебра в рудах в моделях не используются узловые точки серебра, а на золото – узловые точки золота.

Таблица 2. Уменьшение числа факторов и изменение их весомости влияния на концентрации в рудах золота (Au) и серебра (Ag)

Элемент-фактор	Весомость							
	Au				Ag			
Cu	0.14	0.14	0.16	0.08	0.12	0.14	0.06	0.17
Zn	0.14	0.11	0.08	0.32	0.21	0.21	0.22	0.07
S	0.04	0.06	–	0.04	0.07	0.06	–	0.19
Ag	0.21	0.16	0.20	0.56				
Au					0.20	0.20	0.29	0.57
Se	0.08	0.05	–		0.06	0.06	–	
Te	0.05	0.09	0.10		0.15	0.15	0.14	
Cd	0.07	0.11	0.18		0.07	0.09	0.16	
In	0.03	–	–		0.03	–	–	
Co	0.03	–	–		0.04	–	–	
Ga	0.05	0.06	–		0.03	0.01	–	
Tl	0.07	0.08	0.10		0.00	0.02	0.02	
Ge	0.09	0.13	0.16		0.02	0.06	0.11	

Примечание. Весомость дана в долях единицы.

Таблица 3. Содержание основных и примесных элементов в рудном теле 5-14 Гайского медноколчеданного месторождения

Выборка	Кол. проб	Содержание в сорте, %	Факторы												
			%			Г/т									
			Cu	Zn	S	Ag	Au	Se	Te	Cd	In	Co	Ga	Tl	Ge
СК	26	Cu < 0.5 Zn < 1.0	0.2	0.2	37.5	6.6	0.8	26.8	14.8	17.5	1.7	185.1	5.8	4.9	1.6
МК	35	Cu > 0.5 Zn < 1.0	1.4	0.4	29.7	13.1	1.1	18.7	17.3	39.4	1.9	91.7	9.0	4.8	4.2
МЦК	40	Cu > 0.5 Zn > 1.0	3.3	3.4	29.5	33.1	3.0	18.2	26.4	156.4	3.4	67.4	17.0	5.9	4.7
Усредненная 1744/21,8 057	101		1.9	1.6	31.9	19.5	1.8	20.8	20.4	90.5	2.5	110.9	11.1	5.3	4.0
	1		10.6	6.5	25.7	70.3	7.9	20.0	48.0	90.0	2.6	6.0	–	2.0	9.0
	1		10.0	4.4	41.1	36.2	2.54	25.0	56.0	–	11.5	–	12.3	–	4.3

Примечание: СК – серный, МК – медный и МЦК – медно-цинковый сорта руд; по материалам рудного опробования Гайским ГО-Ком. Проба 057 [7].

Таблица 4. Влияние элементов-факторов на концентрации золота (Au) и серебра (Ag) в рудном теле 5-14 Гайского месторождения

Кол-во проб	Элемент	Факторы и их весомость												
		Cu	Zn	S	Ag	Au	Se	Te	Cd	In	Co	Ga	Tl	Ge
101	Au	0.14	0.14	0.04	0.21		0.08	0.05	0.07	0.03	0.03	0.05	0.07	0.09
101	Ag	0.12	0.21	0.07		0.20	0.06	0.15	0.07	0.03	0.04	0.03	0.00	0.02

Примечание. Весомость элемента-фактора дана в долях единицы.

ны результаты рядового (медь, цинк) и группового (золото, серебро и редкие элементы) опробования рудного тела 5-14. На это тело приходится более 40% запасов руд месторождения, что определило выбор его для углубленного изучения геохимических особенностей рудных сортов. В них под микроскопом исследован состав минеральных парагенетических ассоциаций. Используются данные Г.Н. Пшеничного [15, 16], П.Я. Яроша [24], В.П. Молошага, И.В. Викентьева [7] и других исследователей.

Моделирование проводилось методом многомерного ортогонального нормированного сплайна (МОНС), алгоритм которого разработан Б.В. Хакимовым [23]. МОНС имеет вид:

$$Y = F_0 + \frac{F_1(x_1) + F_2(x_2) + \dots + F_n(x_n)}{B_1 + B_2 + \dots + B_n}$$

где F_0 – постоянная составляющая функции; $F_1(x_1)$ – сплайн-составляющие функции от отдельных аргументов; V_1 – веса аргументов в долях единицы, нормирующие вклад каждого из них в функцию.

Использование в уравнениях МОНС весов аргументов $V_1 \div V_n$ позволяет вычислить моделируемый параметр (Y) в условиях, когда часть информации о значениях исходных данных $X_1 \div X_n$ отсутствует или является недостаточной. Линия сплайна позволяет проследить изменение корреляционных связей между элементами, при изменении концентрации последних в рудах. Кроме того, сплайны позволяют рассчитать количество искомого металла, обеспеченное тем или иным элементом-фактором. В моделях использованы тринадцать металлов, которые учтены при подсчете запасов руд Гайского месторождения (1991 г.). Установлен широкий разброс содержания металлов. В связи с этим, для каждого металла выделено пять узлов (табл. 1). Каждый узел характеризуется максимально-близким сгущением точек конкретных значений металла и соответственно с этим обладает наиболее близкими свойствами при соответствующих содержаниях в рудах. Моделирование начинается с расчета весоности металлов, оказывающих влияние на содержание золота и серебра. Значение весоностей приведены в долях единицы. Расчеты показали, что весоности взаимосвязей металлов с золотом и серебром изменяются у различных элементов.

Это позволило выделить четыре группы весоностей (табл. 2). Первая группа характеризуется максимальным набором элементов-факторов, четвертая – минимальным.

Весоности отчетливо показали, что наиболее сильное влияние друг на друга оказывают золото и серебро. Большим влиянием на концентрации золота и серебра в рудах обладают медь, цинк и, отчасти, сера. Рассмотрение выявленных весоностей позволило прийти к выводу о том, что семь элементов-факторов являются оптимальным числом для построения сплайн-моделей.

Первичная статистическая обработка результатов опробования руд подтвердила ранее известные данные о сильной зависимости между содержанием серы, меди и цинка с одной стороны и элементов-примесей – с другой (табл. 3). В то же время, зависимость, выраженная через весоность влияния одного элемента на другой, сильно отличается для разных элементов. Так, на концентрации золота в рудах влияние весоности цинка составляет (0.14), а на концентрации серебра – (0.21). Судя по коэффициентам весоности, на содержание золота в рудах оказывают большое влияние элементы-факторы селен и германий, а на содержание серебра – теллур и кадмий (табл. 4). Сплайн-модели, отражающие изменения коэффициентов корреляции между золотом и серебром, с одной стороны, и элементами-факторами – с другой, имеют криво-

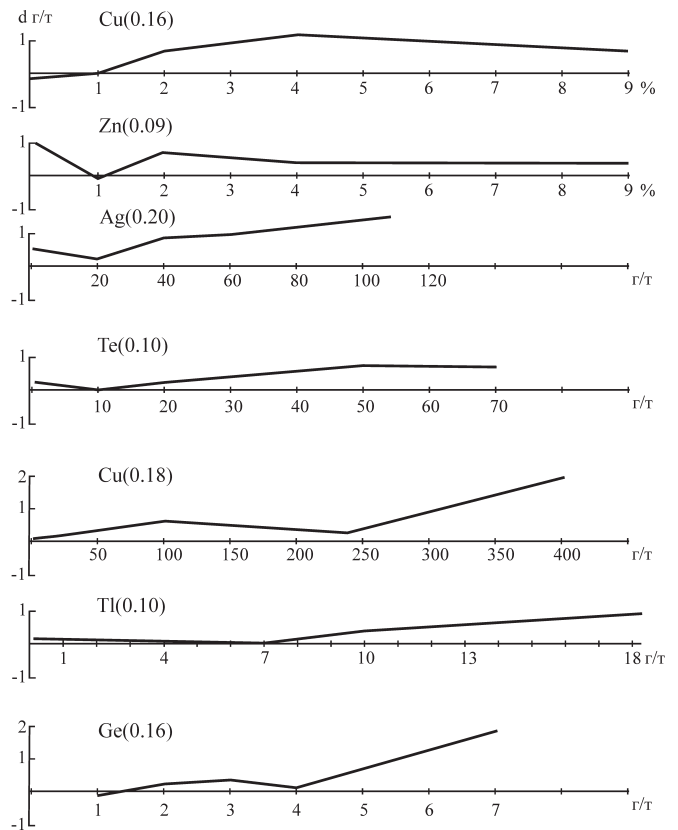


Рис. 8. Сплайн-модель факторов, влияющих на концентрации золота в рудах Гайского месторождения. Здесь и на рис. 9: множественный коэффициент корреляции 0,95; ошибка модели 0,12; по оси абсцисс дано содержание элемента-фактора в рудах, по оси ординат – дифференциал приращения фактора. В скобках указана весоность фактора в долях единицы.

линейную поверхность (рис. 8, 9). Это указывает на то, что при смене концентрации металлов корреляционная зависимость между парами элементов может смениться с прямой на обратную и наоборот. При обычном корреляционном анализе, когда зависимости между элементами меняются с прямых на обратные, вычисляется коэффициент, равный нулю. Считается, что в таком случае связь между парой элементов отсутствует, и она не рассматривается в дальнейшем анализе. Сплайн-модели позволили устранить проблему нулевой зависимости, а криволинейная поверхность сплайнов позволяет получать дополнительную информацию к характеристике минеральных парагенетических ассоциаций. Другой важной особенностью сплайн-моделей является возможность выяснить, какое количество золота или серебра в конкретных пробах обеспечено тем или иным элементом-фактором. Так, для золота формула расчета имеет вид:

$$Au = X_{r/t} + Cu(d) + Zn(d) + Ag(d) + Te(d) + Cd(d) + Tl(d) + Ge(d).$$

Для серебра формула расчёта представлена:

$$Ag = X_{r/t} + Cu(d) + Zn(d) + Au(d) + Te(d) + Cd(d) + Tl(d) + Ge(d)$$

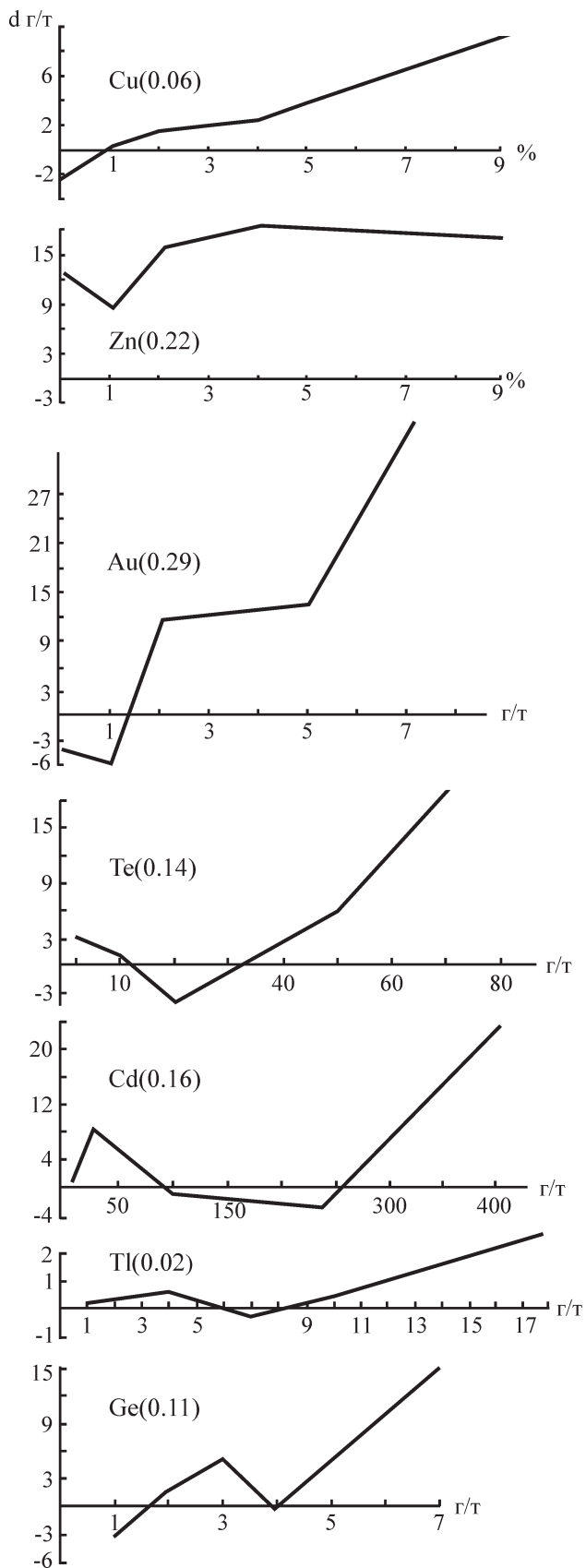


Рис. 9. Сплайн-модель факторов, влияющих на содержания серебра в рудах Гайского месторождения.

$X_{г/т}$ – постоянный коэффициент, который может равняться 0.

Например, в табл. 3 серноколчеданный сорт содержит 0.2% цинка. На сплайнах для цинка можно видеть, что этому значению цинка соответствует концентрация золота равная 0.6 г/т (рис. 8). Все расчеты по влиянию элементов-факторов в рудных сортах рудного тела 5-14 Гайского месторождения на концентрации золота и серебра, приведены в табл. 5. Из данных табл. 5 видна хорошая сходимость данных, полученных по сплайн-моделям, со средними значениями золота и серебра в каждом рудном сорте. Расхождения значений варьируют в пределах от +12.0% до -12.0%. Эта точность расчетов близка к точности пробирного анализа, которым выполнены определения золота и серебра в рудах месторождения. Отличаются данные расчетов по пробам 1744/21,8 и 057. Это расхождение объясняется тем, что в этих пробах или содержатся “ураганные” значения, или отдельные элементы-факторы отсутствуют.

Комплексная обработка данных по вещественному составу руд с помощью сплайн-моделей позволяет получить следующие выводы:

1) серноколчеданный рудный сорт характеризуется максимально высокими содержаниями селена и кобальта;

2) для медного рудного сорта типичны средние значения всех рудообразующих элементов;

3) наиболее богатым является медно-цинковый рудный сорт, содержащий максимально высокие значения меди, цинка, серебра, золота, теллура, кадмия, индия, галлия, таллия и германия;

4) на концентрации золота наибольшее влияние оказывает распределение серебра, кадмия и германия, а также концентрации цинка в интервале значений от 0.1% до 4.0%, что объясняется, исходя из минералогических исследований, отложением золота в барит-полиметаллической и борнитовой минеральных ассоциациях;

5) как видно из рис. 8, медь при содержаниях от 1.0 до 4.0% прямо влияет на концентрацию золота; при более высоких содержаниях меди зависимость практически не проявляется;

6) в отношении теллура и таллия видна слабая положительная корреляция с содержаниями золота.

7) у серебра, в отношении которого зависимости выражены значительно четче, отмечается прямая корреляция с медью во всех интервалах значений и с золотом – в интервалах значений от 1.0 до 7.0 г/т;

8) для редких элементов прямая зависимость наблюдается в зонах высоких значений элементов-факторов (рис. 9);

9) для цинка прямая положительная корреляция с серебром отмечается в интервале значений от 1.0% до 4.0%, при общем высоком положении сплайн-модели.

Положительная прямая корреляция серебра с медью и золотом связана с изоморфным вхождением

Таблица 5. Результаты расчетов по сплайн-моделям долей золота (Au) и серебра (Ag) в рудах Гайского месторождения

Выборка	Металл	Элементы-факторы и их доли								Σ расчетное в г/т	Σ реальное в г/т	Сходимость в %	Au(Ag)+Te+Ge Cu+Zn+Au(Ag)+Te+Cd+Tl+Ge %
		Cu	Zn	Ag	Au	Te	Cd	Tl	Ge				
СК	Au	-0.1	0.6	0.3		-0.01	0.05	0.00	0.05	0.89	0.8	+11.3	38.2
МК		0.2	0.45	0.2		0.05	0.1	0.00	0.18	1.18	1.1	+7.2	36.4
МЦК		0.95	0.3	0.5		0.2	0.45	-0.01	0.40	2.79	3.0	-7.0	39.4
Усреднен- ная		0.55	0.23	0.18		0.14	0.45	0.00	0.17	1.72	1.8	-2.0	28.4
1744/21,8 057		≈0.7	≈0.2	1.3		0.68	0.55	0.09	≈3.6	7.12	7.9	-9.9	78.3
		≈0.7	0.25	0.8		0.7		0.17	2.62	2.5	+3.1	63.7	
СК	Ag	-2.5	12.0		-5.3	-2.5	5.5	0.2	-0.6	6.8	6.6	+3.0	-
МК		0.5	12.0		-6.0	-3.0	7.5	0.3	0.5	11.8	13.1	-11.0	-
МЦК		2.0	18.5		11.6	-3.0	-1.8	0.00	2.0	29.3	33.1	-2.6	36.1
Усреднен- ная		1.4	12.0		9.0	-4.2	0.00	0.3	-0.09	18.41	19.5	-5.5	25.6
1744/21,8 057		≈9.0	18.5		≈35.0	5.6	0.00	0.2	≈16.0	84.3	70.3	+20.0	67.1
		≈9.0	19.1		11.5	5.8		-0.05	45.35	36.2	+25.2	38.0	

Примечание. Доли золота и серебра приведены в г/т; условные см. табл. 3.

серебра и тонкодисперсными включениями золота в халькопирите. Прямая зависимость теллура, кадмия, таллия и германия с серебром в зонах высоких значений редких элементов, по-видимому, связана с появлением в рудах барит-полиметаллической и борнитовой минеральных ассоциаций, в которых распространены собственные минеральные формы благородных металлов и редких элементов.

ОСНОВНЫЕ ВЫВОДЫ

Совокупность структурных, минералого-геохимических данных предыдущих исследователей, эмпирических закономерностей распределения золота и серебра, выясненных авторами, и проведенное математическое моделирование позволяют, как нам представляется, сделать следующие выводы.

1. Оруденение Гайского месторождения формировалось в 2 этапа: **ранний**, осуществлявшийся в условиях близгоризонтального залегания рудовмещающих вулканогенных толщ, и **поздний**, протекавший в условиях крутого залегания вмещающих пород нижнего и среднего стратиграфических уровней.

2. На **раннем этапе** рудообразование происходило циклично: в период отложения толщ баймакбурибаевской свиты рудные тела последовательно формировались на 3-х основных и значительном количестве дополнительных стратиграфических уровней комбинированным вулканогенно-осадочным и метасоматическим способом.

3. Во **второй, поздний этап** рудообразования формировались рудные тела верхнего (3-го) стратиграфического уровня, пологие кровли которых залегают согласно с контактом баймакбурибаевских (D_{1b-br}) и ирендыкских (D_{1-D₂e ir}) отложений. В этот период происходило также обогащение верх-

них выклинок деформированных рудных тел раннего этапа минерализацией барит-полиметаллической ассоциации, а также, вероятно, образование части борнитсодержащих руд. Оба этапа рудообразования были ограничены временем накопления рудосносной формации.

4. Этап преобразования месторождения характеризовался деформированием рудных тел, в том числе, и созданных на 3-м стратиграфическом уровне, расчленением их на блоки и будины и формированием ассоциаций рудных минералов с борнитом. Такой точки зрения на образование борнитсодержащих руд придерживался В.С. Нестеренко на основании того, что эти руды в Стержневой линзе образуют оторочки вокруг колчеданных тектонических будин. Эту точку зрения приняли Ф.П. Буслаев и В.П. Молошаг [4], а также В.А. Прокин, определивший стадию преобразования месторождения как гидротермально-метаморфическую [5, с. 44 и 69–71].

Вместе с тем, одним из авторов статьи в южном борту карьера № 1 наблюдалась согласная с вмещающими породами зональная линза медных руд (рис. 10). Нижняя её часть представлена слоистыми халькопирит-пиритовыми, а верхняя – борнит-халькопирит-пиритовыми рудами. Судя по отсутствию заметных деформаций, положению, форме и асимметричной зональности этого небольшого рудного тела, формирование борнитсодержащих руд в этом случае происходило гидротермально-осадочным или гидротермально-метасоматическим (?) способом в течение позднего этапа рудообразования, а не на этапе преобразования месторождения. Можно, таким образом, предполагать, что борнитсодержащие руды на Гае имеют как вулканогенно-гидротермальное (гидротермально-осадочное или гидротермально-метасоматическое) так и метаморфогенное происхождение.

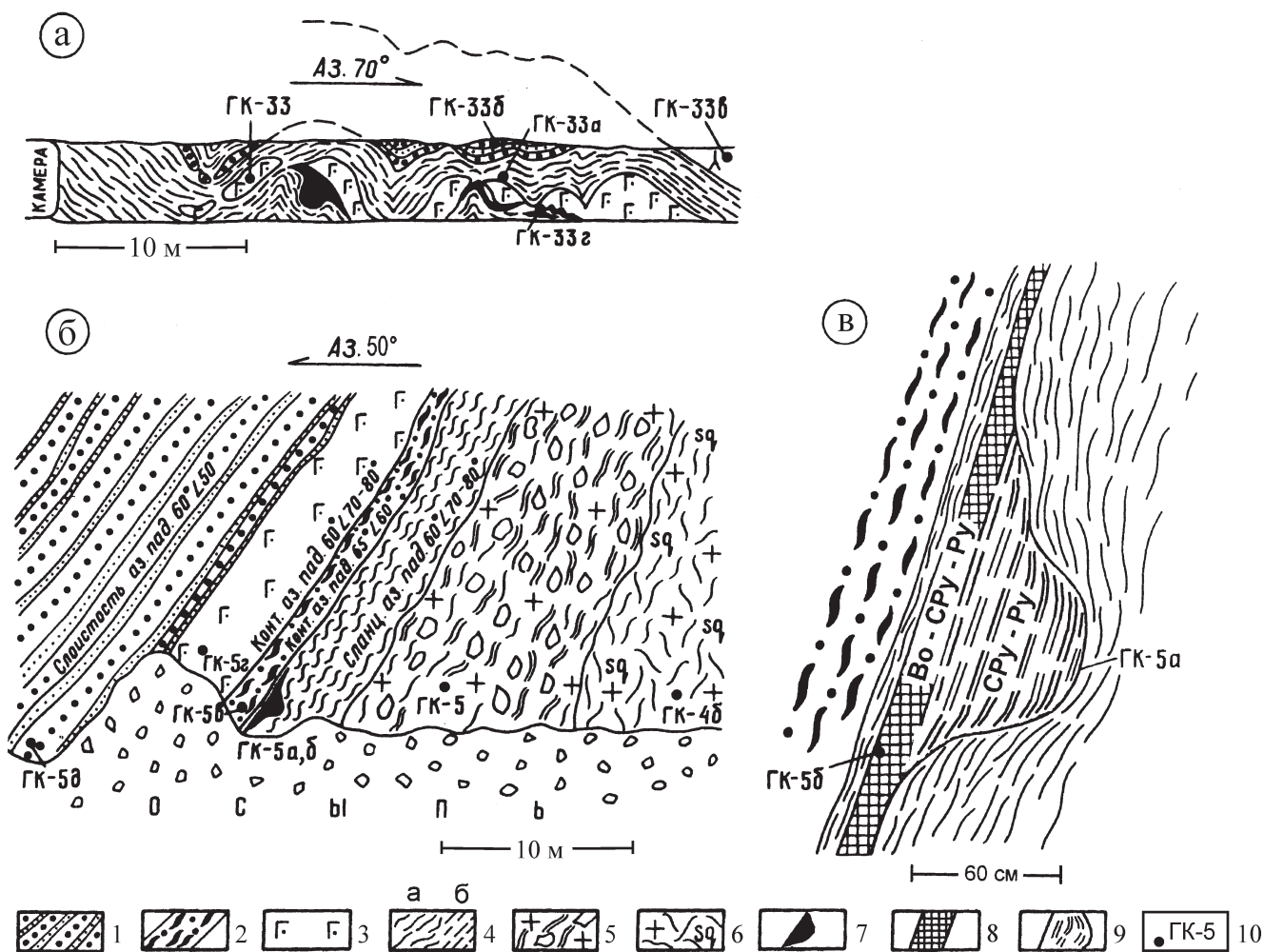


Рис. 10. Гайское месторождение: характерные формы линзовидных слабо деформированных колчеданных рудных тел верхнего стратиграфического уровня. Зарисовки бортов карьера № 1 выполнены И.Б. Серавкиным. а – северо-западный борт, гор. 240 м; б – южный борт, гор. 250 м; в – фрагмент рис. 10б.

1 – слоистые туфы, туфопесчаники, кремнистые алевролиты и пелитолиты вулканогенно-осадочной толщи (D_1 - D_2 e ir); 2-6 – породы рудовмещающей андезит-дацит-риолитовой толщи (D_1 b-br): 2 – игнимбритовидные туфы кислого состава; 3 – базальты эффузивные, 4 – серицитовые сланцы: пloyчатые (а) и параллельно сланцеватые (б); 5 – брекчиевидные серицит-кварцевые метасоматиты по лавобрекчиям риодацитов, 6 – серицит-кварцевые метасоматиты по базокварцевым риодацитам; 7-9 – колчеданные руды: 7 – нерасчленённые по составу, 8 – медноколчеданные борнитсодержащие, 9 – слоистость в медноколчеданных (без борнита) рудах, 10 – места отбора и номера взятых проб. Bo-Cpy-Py – борнит-халькопирит-пиритовые, Cpy-Py – халькопирит-пиритовые слоистые руды.

5. Золото и серебро в гидротермальных растворах первоначально находилось в стабильном соотношении, близком к 1 : 10, о чём свидетельствуют такие соотношения Au : Ag в большинстве колчеданных месторождений, в том числе и в целом на Гайском месторождении. Однако в ходе развития гидротермального процесса благородные металлы вели себя по-разному.

6. Золото характеризуется бимодальным распределением в отношении раннего и позднего этапа рудообразования. На раннем этапе максимальные количества золота отлагались в начальные стадии рудоотложения, когда золото образовало тонкодисперсные выделения в пирите и халькопирите, о чем свидетельствуют минералогические

данные. К конечным стадиям частных геохимических циклов содержания золота уменьшались, что иллюстрирует вертикальная (по нормали к мощности) зональность рудных тел. Об этом же свидетельствует и сплайн-модель зависимости золота от содержания меди, показывающая возрастание содержания Au лишь в интервале 1.0–4.0 г/т Cu и отсутствие влияния фактора меди при дальнейшем возрастании ее содержаний (рис. 8). Часть раннего золота ассоциировалась со сфалеритом, на что указывает латеральная зональность рудных тел и сплайн-модель фактора Zn (рис. 8). На позднем этапе обогащение руд золотом происходило в связи с отложением барит-полиметаллической ассоциации минералов (данные В.П. Молошага) и в

связи с формированием борнитсодержащих руд, когда происходило перераспределение золота и крайне неравномерное обогащение им борнитовых руд.

7. Поведение серебра в ходе развития гидротермальной системы характеризовалось общей тенденцией увеличения его содержаний от раннего к позднему этапу, о чём свидетельствуют сплайн-факторы всех изучавшихся элементов и, отчасти, зональность рудных тел (рис. 4). По данным всех исследователей максимальные количества серебра связаны с поздней барит-полиметаллической минеральной ассоциацией, в частности, с галенитом и блеклыми рудами.

Работа выполнена при финансовой поддержке программы ОНЗ-2.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Бородаевская М.Б., Вахрушев М.И., Контарь Е.С. и др.* Геологическое строение Гайского рудного района и условия локализации в нем медноколчеданного оруденения (Южный Урал). М.: ЦНИГРИ, 1968. 214 с.
2. *Бородаевская М.Б., Требухин В.С., Контарь Е.С.* Реконструкция девонских палеовулканов в Гайском рудном районе и их рудоносность // Вопросы палеовулканизма медноколчеданных провинций Южного Урала и Северного Кавказа. М.: ЦНИГРИ, 1970. С. 46–65.
3. *Бородаевская М.Б., Требухин В.С., Никешин Ю.В.* Особенности рудной зональности Гайского медноколчеданного месторождения (Южный Урал) // Вопросы генезиса эндогенной зональности колчеданных месторождений. М.: ЦНИГРИ, 1979. С. 24–37.
4. *Буслаев Ф.П., Молошаг В.П., Колотов С.В.* О борнитовой стадии преобразования колчеданных руд Урала // Ежегодник-1988. Свердловск: ИГГ УрО АН СССР, 1989. С. 77–79.
5. Гайский ГОК; геология Гайского и Подольского медно-цинковых колчеданных месторождений на Урале. Екатеринбург: ИГГ УрО РАН, 2004. 148 с.
6. *Миронов Е.П., Касьянов Л.В.* Отчет ЦНИГРИ: Основные черты внутреннего строения 3 залежи Гайского месторождения и особенности размещения в её рудах рассеянных элементов, золота и серебра. Москва, 1963 (Фонды ЦНИГРИ и Гайского ГОКа).
7. *Молошаг В.П., Викентьев И.В.* Новые данные о минералогии золота в рудах колчеданных месторождений Урала // Эволюция внутриконтинентальных подвижных поясов: тектоника, магматизм, метаморфизм, седиментогенез, полезные ископаемые. IX Чтения А.Н. Заварицкого. Екатеринбург: ИГГ УрО РАН, 2003. С. 193–197.
8. *Молошаг А.П., Мурзин В.В.* О парагенетических ассоциациях золотосодержащих руд колчеданного месторождения // Ежегодник-1979. Свердловск: ИГиГ УНЦ АН СССР, 1980. С. 106–107.
9. *Нестеренко В.С.* Основные черты геологического строения и вопросы генезиса Гайского медноколчеданного месторождения на Южном Урале // Геология рудных месторождений. 1978. Т. XX. № 3. С. 24–35.
10. *Нестеренко В.С.* Эпигенетические преобразования Гайского медноколчеданного месторождения на Южном Урале. Автореф. дисс. ... канд. геол.-мин. наук. Свердловск, ИГГ УрО АН СССР. 1987. 26 с.
11. *Нестеренко В.С., Буслаев Ф.П., Ярош П.Я., Молошаг В.П.* Гайское месторождение // Медноколчеданные месторождения Урала: Геологическое строение. Свердловск: УрО АН СССР, 1988. С. 120–131.
12. *Нестеренко В.С., Крысина П.Ф. и др.* Изучение закономерностей распределения золота и серебра в рудах Гайского месторождения. г. Гай, 1975. (Фонды Гайского ГОКа).
13. *Никешин Ю.В.* Палеовулканические структуры и условия локализации колчеданного оруденения Гайского рудного поля (Южный Урал). Автореф. дисс. ... канд. геол.-мин. наук / Москва: ЦНИГРИ, 1986. 24 с.
14. *Петровская Н.В.* О полосчатых текстурах руд Гайского и некоторых других медноколчеданных месторождений Урала // Тр. ЦНИГРИ, 1963. Вып. 52. С. 23–64.
15. *Пишеничный Г.Н.* Гайское медноколчеданное месторождение Южного Урала. М.: Наука, 1975. 187 с.
16. *Пишеничный Г.Н.* Текстуры и структуры руд месторождений колчеданной формации Южного Урала. М.: Наука, 1984. 206 с.
17. *Пишеничный Г.Н., Рыкус Н.Г.* К геохимии и минералогии золота и серебра в рудах Гайского медноколчеданного месторождения (Южный Урал) // Геология, полезные ископаемые и проблемы экологии Башкортостана. Мат-лы V Респ. Геол. конф. Т. 2. Уфа: ИГ УНЦ УрО РАН, 2003. С. 13–16.
18. *Серавкин И.Б., Знаменский С.Е., Виноградов А.М.* Особенности глубинного строения крупнейших на Урале Гайского медноколчеданного и Кочкарского золоторудного месторождений // Крупные и суперкрупные месторождения: закономерности размещения и условия образования / Под ред. Д.В. Рундквиста. М.: ИГЕМ РАН, 2004. С. 257–274.
19. *Скрипиль В.И.* О строении вулканогенных толщ Гайского рудного поля и размещении в них колчеданного оруденения // Геология рудных месторождений. 1961. № 1. С. 80–91.
20. *Скрипиль В.И., Недождогин М.С., Сибирская Н.А.* Гайский рудный район // Материалы по геологии и полезным ископаемым Южного Урала. Вып. 3. М.: Госгеолтехиздат, 1962. С. 111–130.
21. *Требухин В.С.* Геологическое строение и история развития Гайской палеовулканической колчеданосной постройки // Вопросы палеовулканизма медноколчеданных провинций Южного Урала и Северного Кавказа. М.: ЦНИГРИ, 1970. С. 83–108.
22. *Фирсов И.Г., Галиханова Д.И.* Отчёт о поисково-оценочных работах на золото в пределах рудовмещающей толщи Гайского медноколчеданного месторождения в 1992–1995 гг. г. Гай, 1995 г. (Фонды Гайского ГОКа).
23. *Хакимов Б.В.* Моделирование корреляционных зависимостей сплайнами на примерах в геологии и экологии. СПб: Изд. дом “Нева”, 2003. 144 с.
24. *Ярош П.Я.* Диагенез и метаморфизм колчеданных руд на Урале. М.: Наука, 1973. 226 с.

Рецензент В.Ф. Рудницкий

Gai massive sulfide deposit: Structure, zonality and gold and silver distribution in the ores

I. B. Seravkin, V. N. Skuratov

Institute of Geology, Ufa Research Centre of RAS

A modern structure of Gai deposit is determined by a thrust which disrupted the ore-bearing andesite-dacite-rhyodacite volcanic structure from the basalt basement and moved it in western direction. The thrust is accompanied in its hanging by a series of upthrow faults that divided ore-bearing rocks into blocks. The deposit was formed in three stages: first and second stages were accompanied by ore formation in the third one the ore bodies were transformed. Zonality of Cu, Zn, Au and Ag distribution was examined by a series of cross-sections which were built on the data obtained by research workers of the Gai deposit. We identify the zonality of several types. There are three types of zonality in the first stage: 1) vertical which consists of single or rhythmic (stratiform) change of pyrite ores by chalcopyrite-pyrite and chalcopyrite-sphalerite-pyrite ones from bottom to top; 2) lateral represents the change of the mentioned ore types towards the flanks of the ore bodies; 3) lateral with a reverse change of ore types, characteristic of the ore bring up channels. In the second stage we establish 4) type of zonality which consists of the enrichment by rise of steeply dipping ore bodies with non-ferrous and noble metals. In the third stage of transformation of the ore bodies is identified 5) type of zonality which is expressed by bornite margins around ore tectonic blocks. The bimodal spreading of Au in ores was established by empiric data and building of spline-models. Au was concentrated in early pyrite and pyrite-chalcopyrite associations and in latest polymetallic and bornite ones. The content of Ag gradually increased from early to late stages of ore formation.

Key words: deposit, sulfide ore, mineralization zonality, pyrite, chalcopyrite, sphalerite, gold, silver, spline-models.