DOI: 10.24411/0869-7175-2019-10012

УДК 553.411
© Р.Ю.Гаврилов, 2019

Аномальная структура геохимического поля золоторудного месторождения Чертово Корыто (Патомское нагорье)

Р.Ю.ГАВРИЛОВ (Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования Национальный исследовательский Томский политехнический университет (ФГАОУ ВО НИ ТПУ); 634050, г. Томск, пр. Ленина, 30)

Приведены результаты обработки геохимических данных по первичным ореолам золоторудного месторождения Чертово Корыто методами математической статистики. Основу исследования составили данные анализов сколковых проб керна вертикальных разведочных скважин. Установлено концентрически-зональное строение аномальной структуры геохимического поля месторождения. Построена обобщённая модель геохимической зональности.
Ключевые слова: золото, Ленский рудный район, аномальная структура геохимического поля, геохимическая зональность, математическая статистика.

Гаврилов Роман Юрьевич
кандидат геолого-минералогических наук

GavrilovRY@tpu.ru

Anomalous structure of the geochemical field of the Chertovo Koryto gold deposit (Patom upland)

R.Yu.GAVRILOV (Tomsk Polytechnic University, TPU)

The results of processing geochemical data on the primary dispersion halos of the Chertovo Koryto gold deposit using the methods of mathematical statistics are presented. The study was based on the data from analyses of chip core samples from vertical exploration wells. The concentric zonal structure of the anomalous geochemical field at the deposit has been established. A generalized model of geochemical zonality has been constructed.
Key words: gold, Lena ore district, anomalous geochemical field structure, geochemical zonality, mathematical statistics.

В последнее десятилетие поисковая геохимия переживает бурные времена из-за внедрения новых методов и методик обработки геохимической информации [2, 4, 5, 7, 9, 19–21]. В первую очередь это связано с проведением работ в более сложных горно-геологических условиях, что требует применения нестандартных решений, зачастую более трудозатратных и, как следствие, дорогостоящих, но позволяющих выйти на конкретный объект с оценкой прогнозных ресурсов и подсчётом запасов соответствующих категорий [6]. Стандартные наборы методов обработки фактического материала не всегда позволяют получать адекватную информацию об объекте исследования [8]. Уникальные месторождения золота (Олимпиадинское, Наталка, Сухой Лог и др.) уже открыты и эксплуатируются, а для регулярного наращивания запасов металла недостаточно проводить их переоценку, необходимо открытие десятков крупных–мелких месторождений или перевод ресурсов в промышленные категории уже известных объектов. Всё это применительно к российской геологоразведочной отрасли делает жизненно необходимым использование в прогнозно-поисковой практике нетрадиционных подходов.

Одной из основ успешного прогнозирования месторождений полезных ископаемых является разработка геохимических, минералогических, геофизических, структурно-динамических и других моделей месторождений. Процесс создания корректной модели месторождения зависит от качества фактического материала, методов его обработки, интерпретации и квалификации исполнителя. В настоящее время существующими методами обработки геохимических данных возможно успешно переинтерпретировать имеющийся банк аналитической информации второй половины прошлого столетия.

В 2006–2007 гг. на золоторудном месторождении Чертово Корыто силами сотрудников Томского политехнического университета под руководством профессора И.В.Кучеренко на основе хозяйственно-договорных отношений с ООО «Тонода» (дочерней компанией

ОАО «Ленская золоторуная компания», г. Бодайбо) проводились полевые исследования с отбором каменного материала [1, 10, 11, 15–17].

Ранее геохимические исследования месторождения выполнялись в двух направлениях: 1) в плане реконструкции геологической истории металлов в рудовмещающей черносланцевой толще [11] и 2) в плане выявления объёмной структуры геохимического ореола, пространственно-временных и причинно-следственных соотношений с ним рудных тел [10].

Было показано, что комплексный рудовмещающий золото-серебро-мышьяковый геохимический ореол месторождения представляет собой плоскую объёмную фигуру, ориентированную вдоль рудоконтролирующего и растворопроводящего разлома, погружающуюся под углом 10°–20° в западном направлении, сложенную метасоматически изменёнными осадочными породами, вмещающую рудную залежь в области наиболее высоких концентраций металлов [11].

Цель настоящей работы – создание модели аномальной структуры геохимического поля (АСГП) месторождения Чертово Корыто для выявления дополнительных поисковых критериев золоторудных объектов в терригенно-карбонатных толщах. Выявление аномальной структуры геохимического поля в пространстве осуществлялось с применением двух принципиальных подходов: первый основан на выделении ассоциаций элементов и анализе их распределения в пространстве, второй – на выделении областей пространства по тождественности геохимических характеристик.

При разработке модели АСГП использовались статистические расчёты ранговой корреляции, энергии рудообразования, дисперсии и вариации геохимического спектра элементов, выполнялся кластерный и факторный анализы.

В работах [11, 17] приведены сведения о геологической позиции и строении месторождения. Ниже приводится краткая характеристика объекта исследования.

Месторождение Чертово Корыто располагается на севере Иркутской области в северной части Патомского нагорья (рис. 1) и является типичным представителем мезотермального золотого оруденения в терригенно-карбонатных породах [11].

Вмещающая оруденение раннепротерозойская толща углеродистых терригенных сланцев михайловской свиты образует брахисинклинальную складку с пологим (10°–20°) падением слоёв. Южное направление падения слоев на севере сменяется на западное и далее на север-северо-западное на юге месторождения. Брахискладка рассекается тектоническим швом северо-север-западного простирания, оперяющим Амандракский глубинный разлом. Свита сложена метаморфизованными до эпидот-амфиболитовой фации песчаниками, алевролитами, аргиллитами, подвергшимися воздействию гидротермального метасоматизма пропилит-березитового типа. Рудовмещающие метасоматиты содержат многочисленные сульфидно-кварцевые прожилки и сульфидную вкрапленность пирита, пирротина, арсенопирита и других минералов, встречающихся гораздо реже. Рудная залежь оконтурена по данным непрерывного опробования и прослежена вдоль разлома на расстояние 1800 м, имеет максимальную мощность около разлома до 140 м. Залежь полого погружается на запад, постепенно выклиниваясь. Её протяжённость по падению достигает 500 м.

При детальном изучении 4 литологических разрезов (БЛ 7, 8а, 19, 30) не установлено взаимосвязи в распределении золота и литологических разностей пород, то есть литологический контроль оруденения отсутствует [10].

На месторождении Чертово Корыто проведено разведочное бурение вертикальных колонковых скважин по сети 50×50 м и подсчитаны запасы категорий C_1 и C_2. В основу работы положены результаты опробования керна скважин. Секционное керновое опробование проводилось для определения содержания золота, а секционное сколковое – для определения содержания золота и его элементов-спутников, а также характера их поведения в пределах рудной зоны. Длина керновых проб составляла в среднем 1 м, а секций сколкового опробования при вариациях длины от 1 до 9 м, в среднем – 3 м.

Пробы на золото анализировались пробирным методом в лабораториях дочерних предприятий Ленской золоторудной компании – ООО «Тонода» и ОАО «Первенец»; чувствительность метода 0,1 г/т. Содержание золота определялось также атомно-абсорбционным методом, и им же проводился контроль результатов, полученных пробирным анализом; чувствительность метода 0,01 г/т. Геохимические пробы анализировались на содержание 28 элементов эмиссионным спектральным приближенно количественным анализом в лаборатории Бодайбинской геологоразведочной экспедиции. Наибольший интерес представляют результаты определения Ba, Be, Zr, Mn, Ti, V, Cr, Ni, Co, Cu, Pb, Zn, Sn, Mo, Li, Sr, Ag, As, Y, P, B. Элементы La, Nb, Sb, W, Bi, Yb, Tl в связи с низкой чувствительностью анализа не обнаружены, либо вариации их содержаний характеризуются одним-двумя значениями, что не позволяет использовать их при статистической обработке геохимических данных. Золото в секционных сколковых пробах анализировалось химико-спектральным анализом; чувствительность метода 0,01 г/т.

Для расчёта статистических показателей по элементам-спутникам золотого оруденения были использованы анализы 4124 сколковых проб по керну скважин. Расчёт фоновых содержаний элементов проводился по стандартной методике с использованием результатов анализов 170 проб, отобранных из керна двух скважин, расположенных на периферии месторождения.

Содержания рудных элементов (Au, As, Ag, Pb, Zn, Cu, Co, Ni) в первичных ореолах рассеяния характеризуются неоднородным распределением.

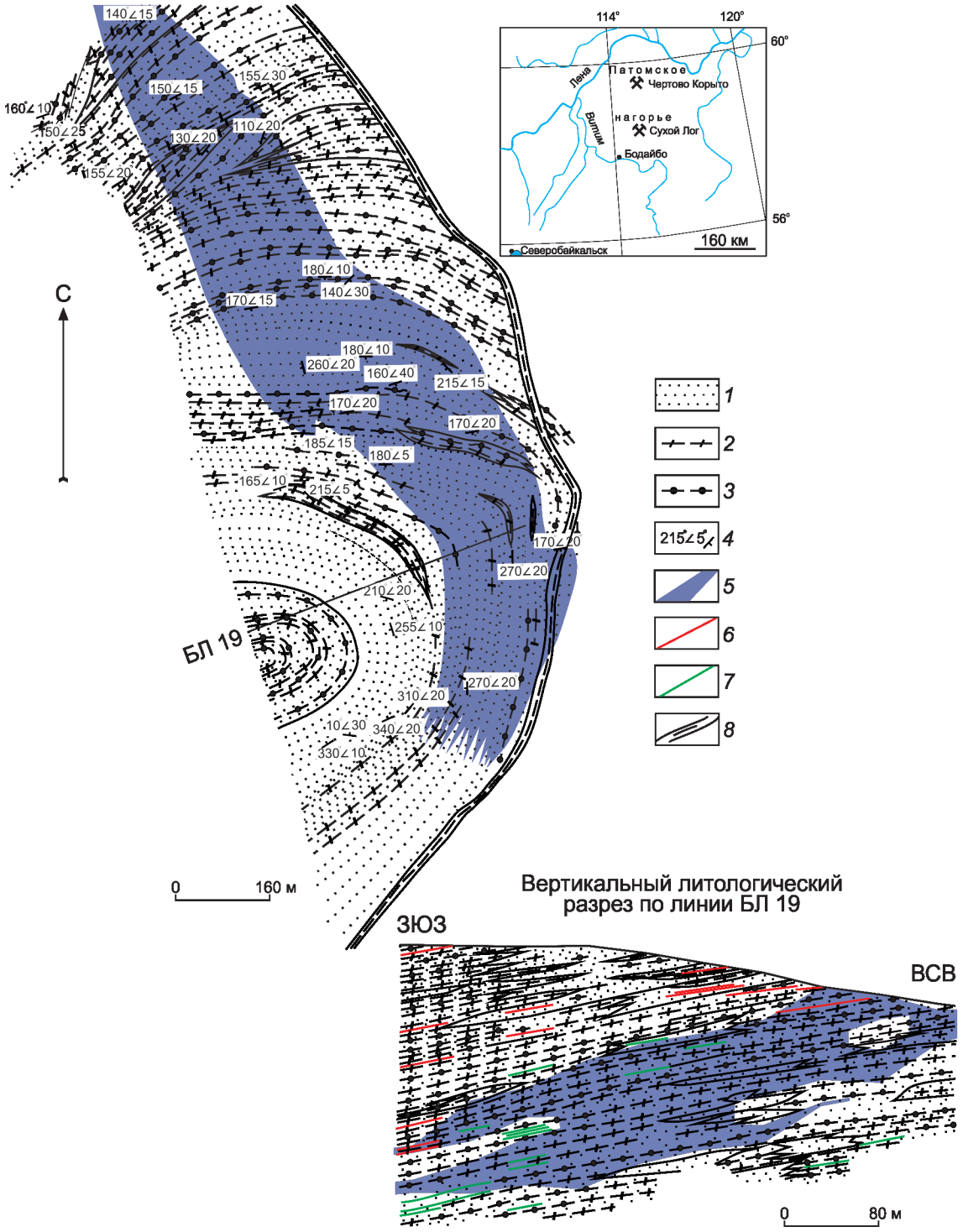


Рис. 1. Схема геологического строения месторождения Чертово Корыто:

плохо отсортированные: *1* – серые до тёмно-серых, от тонко- до среднезернистых, неяснослойчатые грубослоистые полевошпат-кварцевые песчаники, алевро-песчаники, углеродистые и безуглеродистые и *2* – тёмно-серые разнозернистые, от мелко- до крупнозернистых тонкослойчатые до грубослоистых полевошпат-кварцевые алевролиты, песчанистые алевролиты, углеродистые и безуглеродистые; *3* – аргиллиты серицитовые с незначительным (до 25 об.%) содержанием или отсутствием обломочной фракции песчаной и(или) алевритовой размерности, углеродистые и безуглеродистые; *4* – азимут и угол падения слоёв; *5* – область сульфидной минерализации; *6* – зоны тонкого рассланцевания и дробления пород; *7* – тыловые зоны (хлоритовая, альбитовая, березитовая) рудовмещающего метасоматического ореола; *8* – рудоконтролирующий разлом

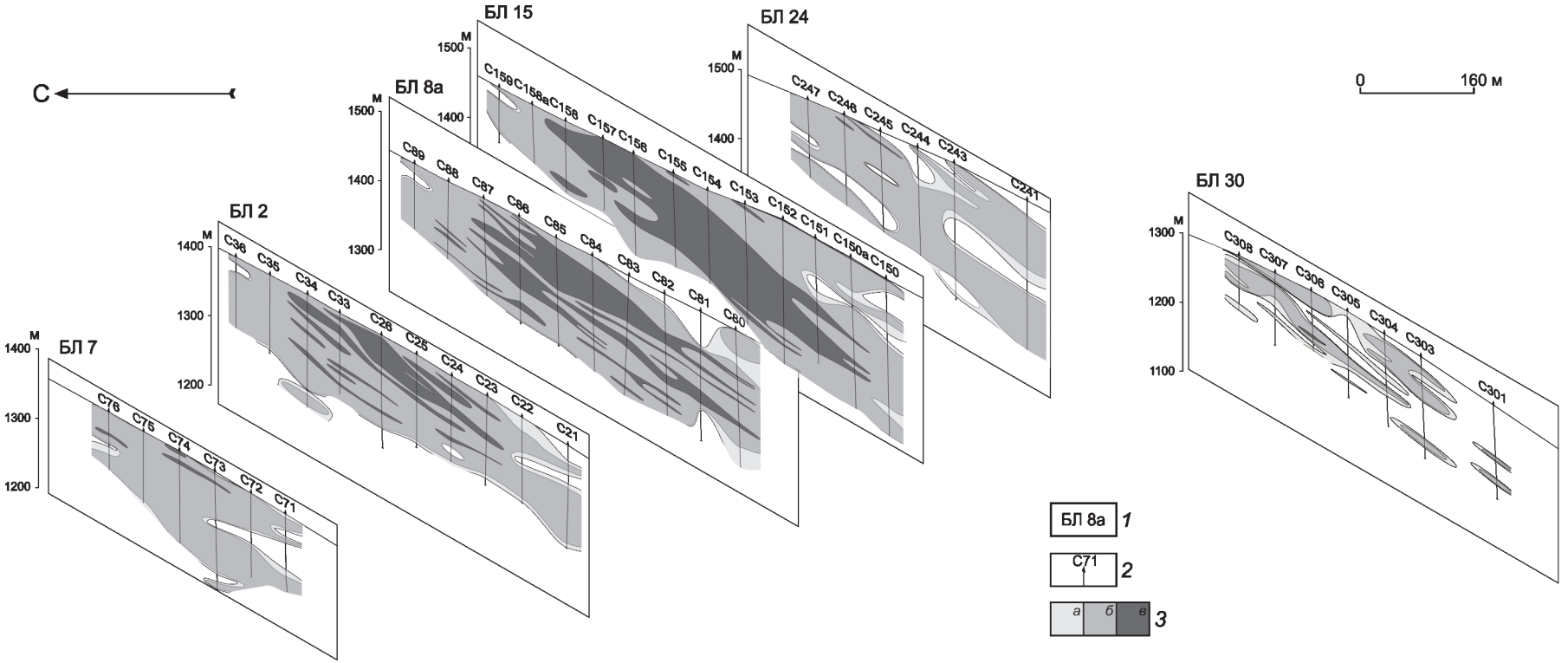


Рис. 2. Блок-диаграмма распределения золота в рудовмещающем метасоматическом ореоле месторождения [10]:

1 – буровые линии и их номера; *2* – разведочные скважины и их номера; *3* – содержание золота (в г/т): *а* – >0,1, *б* – 0,1–1, *в* – <1

Блок-диаграмма распределения золота, построенная на основе результатов кернового опробования, даёт наглядное представление о характере поведения металла в месторождении (рис. 2). Содержание золота в рудном теле колеблется от n×0,01 до n×100 г/т. В центральной части наблюдается максимальная мощность рудного тела с наиболее высокими содержаниями золота. По периферии залежь представлена отдельными маломощными выклинивающимися рудными линзами с более низкими содержаниями металла. Пробность золота закономерно возрастает в ряду верхний→средний→нижний уровень оруденения, изменяясь в пределах от 744 до 971‰, при среднем значении 852‰.

Среди элементов-спутников золотого оруденения наиболее контрастные аномалии в крупнообъёмном метасоматическом ореоле создают As, Ag и Pb. Высококонтрастные ореолы As, на несколько порядков превышающие фоновые значения, в центральной части рудной зоны пространственно совпадают с контурами рудной залежи. В южной и северной частях ореол As простирается согласно рудной зоне, существенно выходя за её пределы. Аномальные концентрации Ag частично совпадают с высококонтрастными ореолами золота. В целом контрастные ореолы Ag с содержаниями, превышающими фоновые значения в сотни раз, хорошо коррелируют с рудной минерализацией. Ореол Pb ведёт себя в объёме рудной залежи неоднозначно, находясь как в контуре рудного тела, так и на его периферии. Его максимальные значения содержания более чем в 300 раз превышают фоновые.

В результате изучения взаимосвязи между рудными элементами методом *ранговой корреляции* установлено, что все рудные элементы (Au, As, Ag, Pb, Zn, Cu, Co, Ni) имеют друг с другом значимую положительную связь. Наибольшими значениями взаимосвязи отличаются Ag, Pb, Zn (r >0,32), при $r_{крит.}$=0,03 для пятипроцентного уровня значимости. Образующие в пределах месторождения контрастные аномалии Ag и As также обладают высоким значением корреляционной связи между собой (r=0,27). Содержание золота, определённое по сколковым геохимическим пробам химико-спектральным анализом, несмотря на наличие лишь 30% проб, превышающих порог обнаружения анализа, проявляет устойчивую взаимосвязь с распределением содержания мышьяка (r=0,25). Тем не менее в силу целого ряда причин (уровень концентрации, предел обнаружения и др.) результаты определения золота по сколкам и керну скважин, за исключением кластер-анализа переменных, при дальнейших расчётах статистических показателей не использовались. Таким образом, методом ранговой корреляции установлен высокий уровень взаимосвязи между рудными элементами.

Рассчитаны показатели, характеризующие интенсивность процессов гидротермально-метасоматического рудообразования: *энергия рудообразования* и *дисперсия,* а также *вариация геохимического спектра*.

Расчёт энергии рудообразования осуществлялся путём суммирования произведений коэффициентов концентрации каждого элемента на их логарифмические значения [14]. Фоновые значения показателя варьируют в пределах от –1 до 2 ед. и в объёме рудной залежи фиксируются крайне редко. В рудном теле величина показателя достигает 10^4 ед. и более. В целом значения показателя энергии рудообразования напрямую зависят от содержания доминирующего элемента – As.

Метод, обеспечивающий оценку степени дифференциации вещества по геохимическому спектру единичной пробы, был предложен И.И.Выборовым и С.Г.Быстровым [3]. В основе расчёта показателей дисперсии (ДГС) и вариации (ВГС) геохимического спектра лежат стандартные формулы дисперсии и вариации нормированных содержаний элементов. В окружающем крупнообъёмный метасоматический ореол пространстве фоновые значения ДГС не превышают значений 0,n ед. В пределах рудной залежи его значения существенно возрастают, достигая в отдельных пробах 10^5 ед. и более. Основной вклад в аномальные значения ДГС вносит As, что и обусловило взаимосвязь в распределении их ореолов.

В пределах рудного тела значения показателя ВГС изменяются от 0,n до 450% и выше, при фоновых значениях, не превышающих 40%. Несмотря на то, что вариация является производной функцией от дисперсии, оба показателя несут различную генетическую информацию [13]. Аномальные значения ВГС не всегда совпадают с аномалиями ДГС. Этот факт подтверждается и на примере месторождения Чертово Корыто. Высококонтрастные ореолы показателя ВГС маркируют границу минерализованной зоны, что, очевидно, обусловлено резкой разницей в концентрации элементов в пределах рудного тела и его обрамления. В целом можно констатировать, что минерализованная зона месторождения характеризуется крайне неравномерным распределением содержаний элементов, и прежде всего, рудных, с ВГС >140%.

Исключение из расчёта показателей энергии рудообразования ДГС и ВГС мышьяка приводит как к уменьшению значений показателей на несколько порядков, так и к резкому сокращению объёма, занимаемого их высококонтрастными ореолами в пределах месторождения.

Таким образом, аномальные значения показателей интенсивности процессов рудообразования соответствуют объёму, занимаемому минерализованной зоной. Однако они не позволяют без дополнительных операций (разбивки элементов на ассоциации по определённому принципу) расшифровать АСГП месторождения.

С использованием *кластер-анализа* построена иерархическая структура корреляционных взаимосвязей элементов (рис. 3). Элементы объединились в следующие группы: 1) Au, As, B, Sr, P, Mo; 2) Ag, Zn, Pb; 3) Li, Co, Sn, Cu, Ni, Cr, V, Mn; 4) Ti, Y, Zr, Be, Ba.

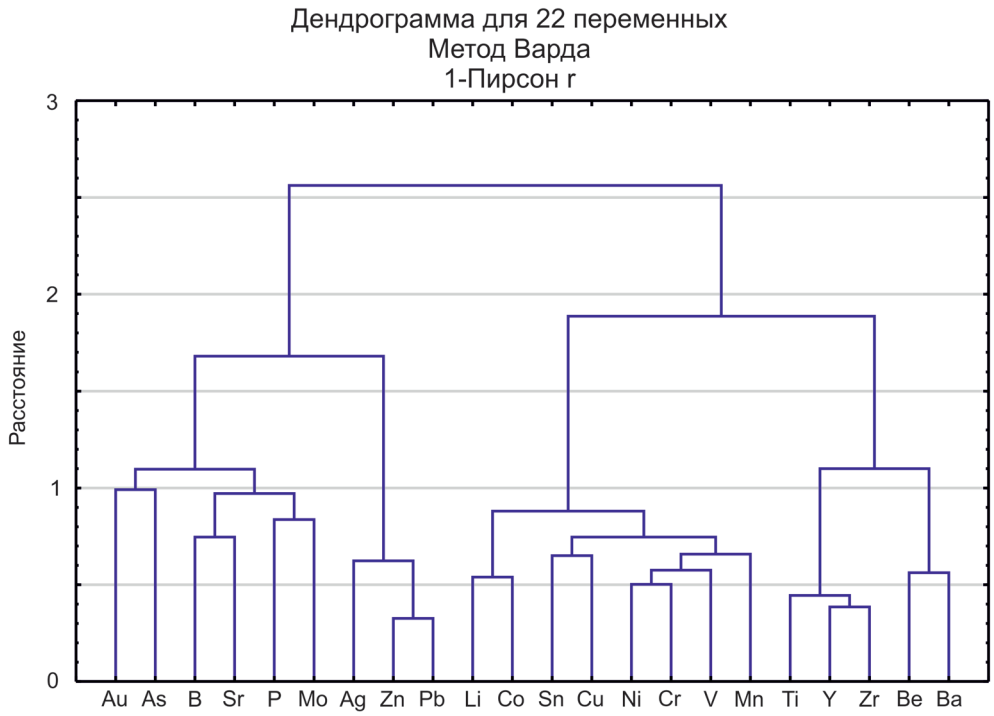


Рис. 3. Результаты кластер-анализа по первичным ореолам рассеяния

Методом К-средних проведено разделение 4124 наблюдений (проб) на 7 кластеров. При статистических расчётах использовались коэффициенты концентрации (КК) элементов. Во всех классах проб, за исключением 4-го, наибольшими концентрациями отличается мышьяк. В первом и втором классах преобладают As (до 800 КК), Pb (до 4,9 КК) и Ag (до 3,3 КК), что обусловило их пространственное совмещение с высококонтрастными ореолами золота. Третий класс проб, также отличающийся высокими содержаниями мышьяка, в целом тяготеет к периферии рудного тела. Для геохимического спектра четвёртого кластера характерна высокая концентрация (в порядке убывания) Ag, Pb, Zn и As. Пробы кластера распространены в пределах рудного тела и отражают пространственное расположение галенит-халькопирит-сфалеритовой минерализации. Пятый и шестой кластеры харакеризуются близкими значениями концентрации элементов, отличаясь лишь содержанием мышьяка. Тем не менее пробы пятого кластера располагаются за пределами контура рудного тела или внутри контуров «пустых» прослоев, а пробы, характеризующие геохимический спектр шестого кластера, практически полностью отсутствуют внутри контура рудного тела и характеризуют слабоизменённые вмещающие породы. Концентрации элементов в седьмом кластере отличаются самыми низкими значениями, а пробы данного кластера эпизодически появляются как в контуре рудного тела, так и вне его.

Выявленные в кластерах ассоциации элементов позволили провести разделение проб на «породные» (5–7 кластеры) и «рудные» (1–4 кластеры). По результатам кластер-анализа установлено зональное строение геохимического ореола месторождения, выразившееся в изменении геохимического спектра пород и руд от крайне неоднородного в ядерной зоне (As до 800 КК, Pb до 4,9 КК, Ag до 3,3 КК) вплоть до фоновых значений концентрации элементов во фронтальной.

Для уточнения ассоциаций элементов и расшифровки АСГП проведён *факторный анализ*. Было выделено три ассоциации элементов, суммарный вклад которых в общую дисперсию составляет 43%. Геометризация значений факторов проиллюстрирована на примере разведочной линии БЛ 15 (рис. 4).

Ассоциация элементов Ba, Be, Zr, Ti, Y характерна для фронтальной зоны гидротермально-метасоматического ореола и отражает процесс выноса элементов из его центральной зоны на периферию в процессе березитизации.

Распределение значений первого фактора обусловлено привносом в метасоматический ореол Cr, Ni, Co, Cu, Mn, V, Sn, P на этапе завершения березитизации и их вытеснением из центральной зоны в последующие

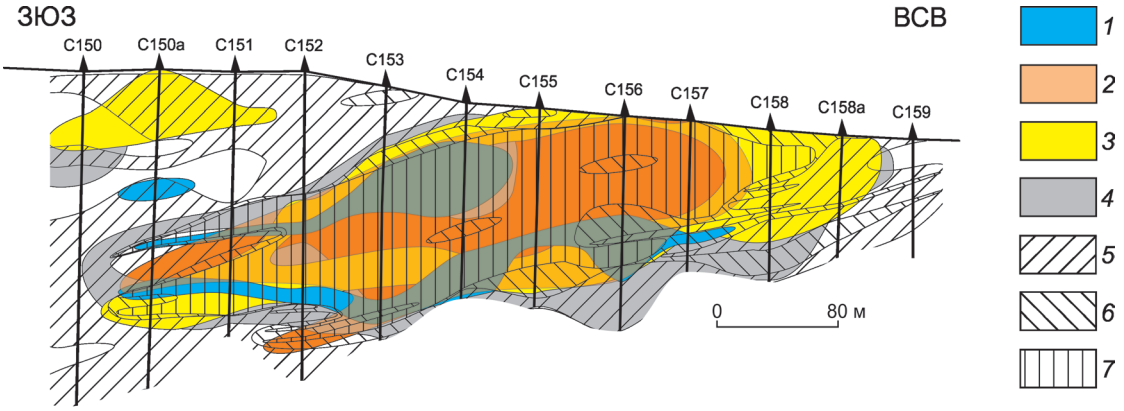


Рис. 4. Схема распределения геохимических ассоциаций элементов на основе факторного анализа:

1–4 – геохимические ассоциации: *1* – Au-Ag-Pb-Zn, *2* – Au-As, *3* – Cr-Ni-Co-Cu-Mn-V-Sn-P, *4* – Ba-Be-Zr-Ti-Y; *5–7* – содержание золота (в г/т): *5* – >0,1, *6* – 0,1–1, *7* – <1

стадии рудоотложения. По данным минералого-геохимического картирования, As концентрируется в ядерной зоне в форме арсенопирита. Ассоциация Pb, Zn, Ag связана с образованием наиболее позднего продуктивного полиметаллического минерального комплекса.

На основе статистической обработки геохимических данных, с использованием показаний минералого-геохимического картирования составлена обобщённая модель геохимической зональности месторождения (рис. 5).

Установленные геохимические ассоциации согласуются со схемой стадийности минералообразования [1].

Ранняя Ba-Be-Zr-Ti-Y ассоциация элементов, выщелоченных и переотложенных в процессе кислотного метасоматоза (кварц-рутил-пирит-пирротиновый комплекс), окаймляет периферию минерализованной зоны. В промежуточной зоне метасоматического ореола распространена Cr-Ni-Co-Mn-V-Sn-P-(As) геохимическая ассоциация, обусловленная образованием кварц-пирит-арсенопирит-пирротинового комплекса, завершающего березитизацию. Отложение Au-As ассоциации происходило в более позднее время с образованием арсенопирита в составе кварц-пирит-арсенопиритового с золотом минерального комплекса. Пространственное совмещение ореола мышьяка и золоторудной минерализации нарушается в краевых частях месторождения, в связи с чем использование мышьяка в качестве элемента-индикатора в отдельных случаях представляется затруднительным. Наиболее поздняя ассоциация Au-Ag-Pb-Zn-Cu полиметаллической с золотом стадии рудообразования (золото, галенит, сфалерит, халькопирит) приурочена к центральной части метасоматически изменённых пород. Схожая картина геохимической зональности наблюдается и в других месторождениях [2, 12, 18].

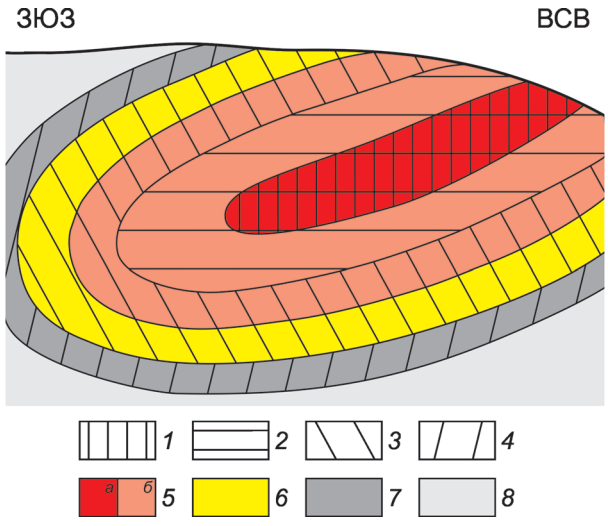


Рис. 5. Обобщённая модель геохимической зональности месторождения Чертово Корыто:

обобщённая модель геохимической зональности месторождения Чертово Корыто: *1–4* – минеральные комплексы/геохимические ассоциации от поздних к ранним: *1* – кварц-полиметаллический с золотом/Au-Ag-Pb-Zn-Cu, *2* – кварц-пирит-арсенопиритовый с золотом/Au-As, *3* – кварц-пирит-арсенопирит-пирротиновый/Cr-Ni-Co-Mn-V-Sn-P-(As), *4* – кварц-рутил-пирит-пирротиновый/Ba-Be-Zr-Ti-Y; *5–7* – зоны метасоматического ореола: *5* – центральная: подзоны: *а* – полиметаллическая и *б* – мышьяковая, *6* – промежуточная, *7* – фронтальная; *8* – вмещающие породы

Характер распределения геохимических ассоциаций элементов позволил сделать вывод о концентрически-зональном строении геохимического поля месторождения, что выражено в закономерной смене последовательно формирующихся геохимических ассоциаций элементов и зон гидротермально-метасоматического ореола (от периферии к центру): Ba-Be-Zr-Ti-Y/фронтальная, Cr-Ni-Co-Mn-V-Sn-P-(As)/промежуточная, Au-As и Au-Ag-Pb-Zn-Cu/центральная.

Применённый комплекс методов обработки геохимической информации совместно с использованием данных минералого-геохимического картирования [1] обеспечил расшифровку аномальной структуры геохимического поля золоторудного месторождения Чертово Корыто.

Установленную геохимическую зональность возможно использовать на ранних стадиях геологоразведочного процесса как по первичным геохимическим ореолам, в том числе единичным горным выработкам и скважинам, так и по вторичным ореолам с поправкой на подвижность элементов в процессе гипергенеза.

Автор благодарит Валерия Гавриловича Ворошилова за ценные замечания и предложения, существенно улучшившие содержание статьи.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Вагина (Синкина) Е.А.* Минеральные комплексы руд и генезис золоторудного месторождения Чертово Корыто (Патомское нагорье) // Известия Томского политехнического университета. 2012. Т. 321. № 1. С. 63–69.
2. *Ворошилов В.Г.* Аномальные структуры геохимических полей гидротермальных месторождений золота: механизм формирования, методика геометризации, типовые модели, прогноз масштабности оруденения // Геология рудных месторождений. 2009. Т. 51. С. 3–19.
3. *Выборов С.Г., Быстров И.И.* Опыт использования комплексного показателя нарушенности геохимического поля для прогнозирования оруденения // Известия ВУЗов. Геология и разведка. 1990. № 4. С. 102–110.
4. *Григоров С.А.* Генезис и динамика формирования Наталкинского золоторудного месторождения по данным системного анализа геохимического поля // Руды и металлы. 2006. № 3. С. 44–48.
5. *Григоров С.А.* Основы структурной интерпретации геохимических полей рудных объектов для целей их локализации и оценки // Отечественная геология. 2007. № 4. С. 45–52.
6. *Иванов А.И.* Опыт прогнозирования, поисков и оценки новых золоторудных месторождений в Бодайбинском рудном районе // Отечественная геология. 2008. № 6. С. 11–16.
7. *Иванов А.И.* Особенности применения традиционных методов поисков месторождений рудного золота в сложных горно-таежных ландшафтах // Отечественная геология. 2013. № 6. С. 12–20.
8. *Инструкция* по геохимическим методам поисков рудных месторождений. – М.: Недра, 1983.
9. *Ионно-сорбционный* метод литохимических поисков скрытых полиметаллических месторождений: общие принципы, опыт применения / С.А.Миляев, С.Г.Кряжев, Ю.В.Виленкина // Руды и металлы. 2017. № 2. С. 60–68.
10. *Объёмная* геолого-геохимическая модель мезотермального золоторудного месторождения Чертово Корыто (Патомское нагорье) / Р.Ю.Гаврилов, И.В.Кучеренко, В.Г.Мартыненко, А.В.Верхозин // Известия Томского политехнического университета. 2009. Т. 315. № 1. С. 30–43.
11. *Петролого-геохимические* черты рудовмещающего метасоматического ореола золоторудного месторождения Чертово Корыто (Патомское нагорье) / И.В.Кучеренко, Р.Ю.Гаврилов, В.Г.Мартыненко, А.В.Верхозин // Известия Томского политехнического университета. 2008. Т. 312. № 1. С. 11–20.
12. *Плющев Е.В., Шатов В.В.* Геохимия и рудоносность гидротермально-метасоматических образований. – Л.: Недра, 1985.
13. *Поцелуев А.А., Быстров И.И., Гаврилов Р.Ю.* Показатели дисперсии и вариации геохимического спектра как критерии неоднородности геохимического поля / Прикладная геохимия. Вып. 3. // Прогноз и поиски. – М.: ИМГРЭ, 2002. С. 419–428.
14. *Сафронов Н.И., Мещеряков С.С., Иванов Н.П.* Энергия рудообразования и поиски полезных ископаемых / Под ред. Н.И.Марочкина. – Л.: Недра, 1978.
15. *Синкина Е.А., Гаврилов Р.Ю.* Объёмная модель пирротиновой минерализации золоторудного месторождения Чертово Корыто, Патомское нагорье // Руды и металлы. 2018. № 1. С. 54–63.
16. *Синкина Е.А., Кучеренко И.В., Гаврилов Р.Ю.* Типоморфизм пирротинов золоторудного месторождения Чертово Корыто (Патомское нагорье) // Геология и минерально-сырьевые ресурсы Сибири. 2017. № 1. С. 58–65.
17. *Структурно-динамическая* модель золоторудных месторождений, образованных в несланцевом и черносланцевом субстрате. Ч. 2. Месторождение Чертово Корыто (Патомское нагорье) / И.В.Кучеренко, Р.Ю.Гаврилов, В.Г.Мартыненко, А.В.Верхозин // Известия Томского политехнического университета. 2009. Т. 314. № 1. С. 23–38.
18. *Чекваидзе В.Б., Миляев С.А.* Эндогенные ореолы сидерофильных элементов золоторудных месторождений // Руды и металлы. 2009. № 6. С. 15–20.
19. *Chemical* diagenesis in near-surface zone above oil fields in geochemical exploration / I.S.Sobolev, N.P.Bredikhin, T.Bratec et al. // Applied Geochemistry. 2018. Vol. 95. P. 33–44.
20. *Kristiansson K., Malmqvist L.* Trace elements in the geogas and their relation to bedrock composition // Geoexploration. Vol. 24. 1987. P. 517–534.
21. *TEM study* of geogas-transported nanoparticles from the Fankou lead-zinc deposit, Guangdong Province, South China / X.Wei, J.Cao, R.F.Holub et al. // Journal of Geochemical Exploration. 2013. Vol. 128. P. 124–135.