

УДК 553.411.071:550.4

КАРТИРОВАНИЕ ВЕРТИКАЛЬНОЙ ГЕОХИМИЧЕСКОЙ ЗОНАЛЬНОСТИ НА ПРИМЕРЕ ЗОЛОТОРУДНОГО МЕСТОРОЖДЕНИЯ ЧЕРТОВО КОРЫТО (ПАТОМСКОЕ НАГОРЬЕ)

Гаврилов Роман Юрьевич,

канд. геол.-минерал. наук, доцент кафедры геологии и разведки полезных ископаемых Института природных ресурсов ТПУ,
Россия, 634050, г. Томск, пр. Ленина, д. 30. E-mail: GavrilovRY@ignd.tpu.ru

Проведена обработка геохимических данных по вторичным ореолам рассеяния мезотермального золоторудного месторождения Чертово Корыто с целью определения местоположения уровней оруденения на дневной поверхности. Основу исследования составили данные анализов сколковых проб, отобранных из поверхностных горных выработок и керн вертикальных разведочных скважин. Полученные аналитические данные обработаны с помощью дискриминантного анализа, основанного на «распознавании образов». Установлено, что геохимические спектры над-, средне- и подрудного уровней золотого оруденения имеют существенные различия. В результате разделения массива геохимических проб на основе отнесения их к эталонным выборкам, проведено выделение трех уровней оруденения на площади месторождения. Показана принципиальная возможность применения дискриминантного анализа для картирования уровней золотого оруденения.

Ключевые слова:

Золото, вторичные ореолы рассеяния, эрозионный срез, уровни оруденения, эталонные выборки, дискриминантный анализ, картирование.

Постановка задачи

Определение эрозионного среза рудных месторождений, геохимических характеристик уровней оруденения имеет существенное значение как для теории рудообразования, так и для практики проведения геологоразведочных работ (ГРР).

Наиболее детально теория эндогенной осевой, поперечной и продольной геохимической зональности первичных ореолов изучена в работах [1, 2]. В результате многолетних исследований нескольких сотен сульфидсодержащих гидротермальных рудных месторождений различного генезиса, располагающихся в различных тектонических обстановках, был составлен обобщенный ряд осевой (вертикальной) геохимической зональности. Определение геохимических ассоциаций элементов, участвующих в процессе рудообразования, позволяет посредством геохимического картирования наряду с минералогическими исследованиями установить очередность процесса отложения рудоносных гидротермальных растворов и выделить области, соответствующие тому или иному гипсометрическому уровню оруденения.

Практика проведения прогнозно-поисковых работ показывает, что своевременное установление уровня эрозионного среза оруденения позволяет избежать существенных материальных и трудовых затрат на изучение объектов, в существенной степени уничтоженных процессами денудации. Кроме этого, выделение ассоциаций химических элементов, характерных определенному уровню оруденения на эталонных объектах, позволяет на площадях, благоприятных для выявления объектов аналогичного генезиса, определять степень их эродированности, местоположение на изучаемой площади и в объеме недр и, следовательно, определять степень их перспективности.

Методика определения ряда вертикальной геохимической зональности элементов-индикаторов, предложенная в [2], несмотря на ее активное использование в практике ГРР [3], не всегда позволяет получать однозначно трактуемые результаты. В связи с этим назрел вопрос о разработке новых методов и подходов в определении положения уровней рудных тел. Из множества существующих методов наиболее удачным нам представляется использование методов математической статистики, выделяющих группы проб по схожести поведения ассоциаций химических элементов, с использованием всего геохимического спектра проанализированных элементов. Одним из методов, зарекомендовавших себя в практике проведения ГРР, является дискриминантный анализ [4].

На примере золоторудного месторождения чернотанцевой формации Чертово Корыто, показана возможность использования дискриминантного анализа для картирования уровней оруденения, выходящих на дневную поверхность, по результатам опробования вторичных ореолов рассеяния.

Методика исследования

Месторождение Чертово Корыто изучено с помощью поверхностных горных выработок и разведочных скважин. Подсчитаны запасы категорий C_1+C_2 , позволяющие отнести его к крупным месторождениям золота. В основу работы положены результаты анализов секционного сколкового опробования траншей и близповерхностных проб из керна скважин с определением содержания элементов-спутников золотого оруденения. Длина групповых секционных сколковых проб, отобранных из траншей, варьировала от 2 до 8 метров. Протяженность траншей достигала 400 и более метров, что позволяло пересекать рудную залежь и выходить за ее пределы. В статистические расчеты

включены результаты анализов сколковых проб, отобранных из измененного (процессами выветривания) керна разведочных скважин до глубины 6 метров от поверхности.

Эмиссионным спектральным полуколичественным методом в лаборатории Бодайбинской экспедиции по групповым секционным пробам, составленным из сколковых проб, проведен анализ содержания стандартного набора элементов ($n=28$). Во всех секционных пробах определены барий, бериллий, цирконий, марганец, титан, ванадий, хром, никель, кобальт, свинец, медь, цинк, олово, молибден, литий, ниобий, стронций, серебро, мышьяк, иттрий, вольфрам, фосфор, бор. Лантан, сурьма, висмут, иттербий, таллий характеризуются содержаниями ниже чувствительности анализа.

При создании эталонных выборок по трем уровням оруденения были использованы пробы (не менее 30 для каждого уровня) из четырех траншей, расположенных в различных частях месторождения. Для определения положения уровней оруденения на дневной поверхности использованы анализы более 1700 секционных сколковых проб. Золото не включалось в спектр элементов, участвующих в процедуре проведения дискриминантного анализа в связи со значительной нагрузкой, оказываемой на канонические переменные.

Методика проведения дискриминантного анализа подробно описана в [5]. Применение этого метода с целью оценки уровня эрозионного среза обусловлено тем, что он основан на «распознавании образов», которые используются для отнесения

(«дискриминирования») переменных к тем или иным наборам данных («группам»). При дополнении эталонной выборки новыми пробами с неизвестными характеристиками они относятся к одной из выделенных групп с вероятностью от 0 до 100 %.

Краткий очерк геологического строения месторождения

Геологическая позиция и строение месторождения описаны в работах [6].

Месторождение располагается на севере Иркутской области в северной части Патомского нагорья (рис. 1). Оно является типичным представителем мезотермального золотого оруденения в черных сланцах. Рудная залежь локализована в синклинальной брахискладке, образованной толщей раннепротерозойских углеродистых пород михайловской свиты (рис. 2). Углы падения пород варьируют от субгоризонтальных до пологих ($10...20^\circ$) с изменением направления падения от южного на северном фланге до северо-северо-западного на южном. Складка осложнена флексурами более высоких порядков. Толща сложена метаморфизованными до эпидот-амфиболитовой фации аркозовыми разнозернистыми, мелкозернистыми песчаниками, алевролитами, аргиллитами. Все породы обогащены углеродом от долей до 2 об. %. Пачка терригенно-осадочных пород подверглась метасоматическим изменениям пропилит-березитового профиля с образованием многочисленных золото-сульфидно-карбонат-кварцевых жил и прожилков.

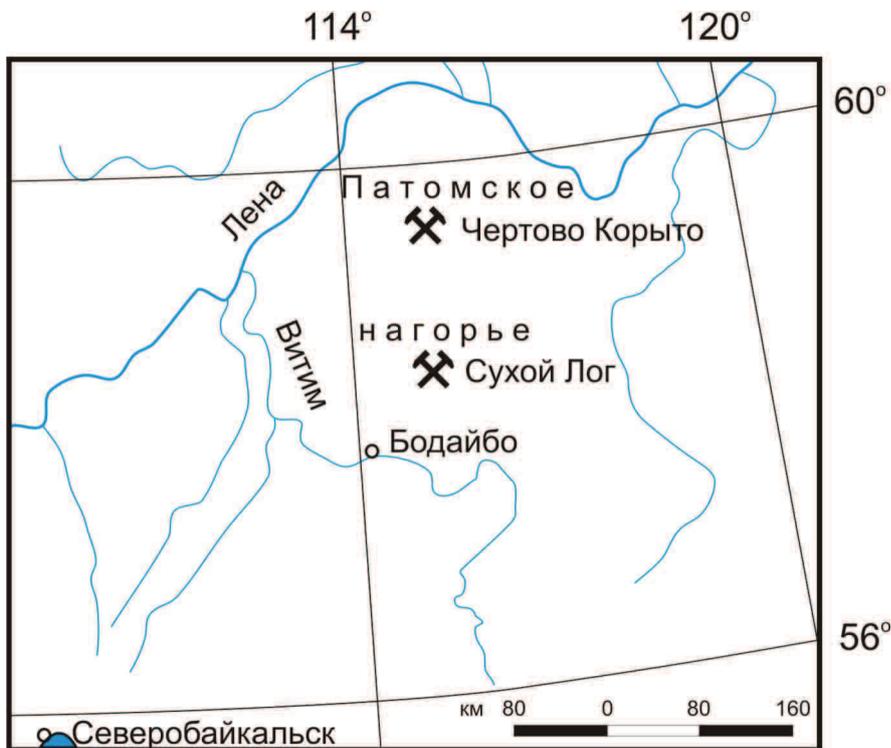


Рис. 1. Схема расположения месторождения Чертово Корыто

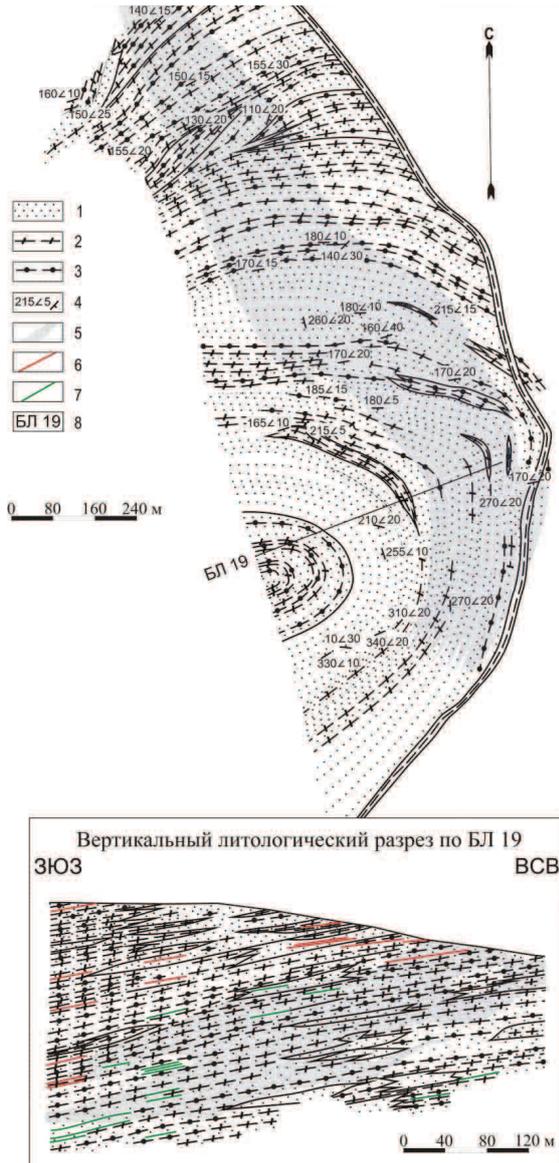


Рис. 2. Схема геологического строения месторождения Чертово Кoryто: 1) как правило, плохо отсортированные серые до темно-серых, от тонко- до среднезернистых, неяснослойчатые грубослойчатые полевошпат-кварцевые песчаники, алевро-песчаники, углеродистые и безуглеродистые; 2) как правило, плохо отсортированные темно-серые разнозернистые, от мелко- до крупнозернистых тонкослойчатые до грубослойчатых полевошпат-кварцевые алевролиты, песчаные 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 слоев; 5) область сульфидной минерализации; 6) зоны тонкого расщепления и дробления пород; 7) тыловые зоны (хлоритовая, альбитовая, березитовая) рудовмещающего метасоматического ореола

Рудная залежь контролируется глубинным разломом север-северо-западного простирания, падающим в запад-юго-западном направлении под углом около 60° . Она образована в висячем боку

разлома, оконтурена по бортовому содержанию $0,5$ г/т, полого (до 20°) погружается в западном направлении при протяженности $1,8$ км и ширине до 500 м. Ее мощность достигает 140 м. Содержание золота в рудном теле колеблется от сотых долей до сотен г/т. Проба золота варьирует в пределах от 744 до 971 ‰. В зависимости от принятого варианта кондиций размеры рудной залежи и количество запасов существенно изменяются. В центральной части наблюдается максимальная мощность рудного тела с наиболее богатыми рудными интервалами. По периферии залежь представлена отдельными маломощными выклинивающимися рудными линзами с более низкими содержаниями металла. Сравнение детально изученных литологических разрезов по 4 разведочным профилям с данными о распределении золота не выявило литологического контроля оруденения.

Аномальная структура геохимического поля

Ранее в работе [7] были детально изучены геохимические особенности распределения вторичных ореолов рассеяния золота и его элементов-спутников – серебра, мышьяка, свинца, цинка, меди, никеля, кобальта.

Вторичный ореол золота в пределах рудной залежи отличается высококонтрастными аномалиями (рис. 3), превышающими фоновые значения в 100 – 1000 и более раз.

Содержание золота во вторичном ореоле изменяется от $0,05$ до $n \times 10$ г/т. Его распределение на дневной поверхности, как и в объеме месторождения, крайне неравномерно. Наибольшие значения отмечаются внутри контура выхода рудного тела на дневную поверхность – среднерудный уровень оруденения. Ореолы с концентрацией золота выше 1 г/т также локализованы в северной части месторождения. Наименьшей концентрацией элемента характеризуется западная часть минерализованной зоны, соответствующая надрудному уровню оруденения. В восточной части, отвечающей подрудному уровню, содержание золота варьирует от следов до значений <1 г/т. Таким образом, по результатам аналитических определений содержания золота во вторичных ореолах частично можно выделить среднерудный уровень оруденения. Очевидно, что для уверенного выделения всех уровней оруденения, выходящих на дневную поверхность, не достаточно рассматривать распределение содержания основного рудного элемента – золота, а необходимо использовать полный спектр проанализированных элементов.

Строение аномального геохимического поля расфигуровано с применением комплекса методов математической статистики. Основной вклад в создание аномальной структуры геохимического поля месторождения Чертово Кoryто вносят высококонтрастные ореолы рудогенных элементов: золота, серебра, мышьяка и свинца. Установлено концентрически зональное строение геохимического ореола месторождения. Это обстоятельство затруд-

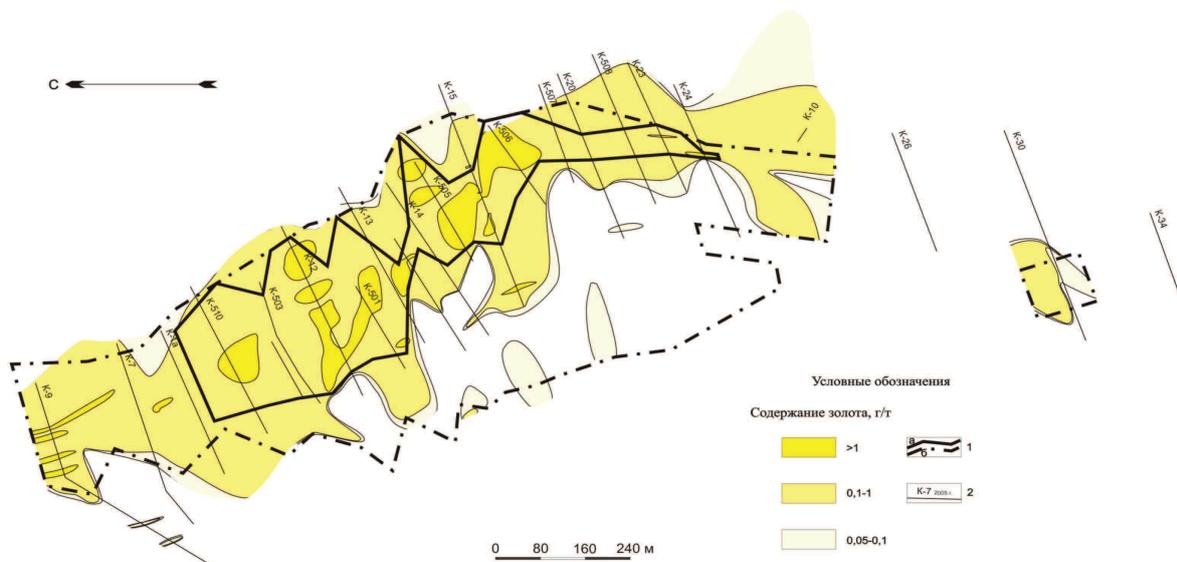


Рис. 3. Распределение содержания золота на дневной поверхности месторождения. Здесь и на рис. 5: 1) контур промышленной рудной залежи на дневной поверхности (а) и контур не выходящих на дневную поверхность флангов промышленной рудной залежи в проекции на горизонтальную плоскость (б); 2) траншеи и их номера

няет оценку уровня эрозионного среза традиционными методами (ряды геохимической зональности, ранжирование и др.).

Результаты исследования

Для определения пространственного положения уровней оруденения на дневной поверхности методом дискриминантного анализа было создано три выборки (около 30 проб в каждой), характеризующие над-, средне- и подрудный уровни. В отличие от предыдущих исследований [8], использование только основных рудогенных элементов (Ag, As, Pb, Zn, Cu, Co, Ni) при проведении дискриминантного анализа не позволило разделить пробы на классы, соответствующие уровням оруденения, поэтому в статистических расчетах участвовали все 23 химических элемента, определенных эмиссионным спектральным полуколичественным анализом.

В результате проведения дискриминантного анализа три уровня оруденения заняли свои области в осях многомерных канонических переменных (рис. 4).

Очевидно, что состав геохимических ассоциаций, участвующих в формировании той или иной группы проб во вторичных ореолах рассеяния, зависит как от минерального состава первичных ореолов рассеяния, так и от характера поведения элементов в зоне гипергенеза. Несмотря на использование всех химических элементов в статистических расчетах, интерпретация поведения Cr, Nb, Sr, W, Y представляется затруднительной из-за незначительных вариаций их содержания, обусловленной их слабой подвижностью в пределах гидротермального метасоматического ореола и/или точностью выполненного анализа.

Подрудный уровень золотого оруденения отличается более низкими значениями содержания ассоциации элементов, характерных для среднерудного уровня, – Co, Zn, As, P, и характерных для надрудного, – Mn, Ti, V, Ni, Cu, Zn. В первом случае это, вероятно, связано с менее интенсивными процессами гидротермальной переработки терригенно-осадочных пород, а во втором – с процессами выноса петрогенных и рассеянных элементов на периферию минерализованной зоны. В то же время на нижнем уровне также отмечаются повышенные содержания Sn, В, обусловленные высокой концентрацией касситерита и турмалина в нижней части гидротермально-метасоматической колонны, что характерно для большинства мезотермальных золоторудных месторождений. Для надрудного уровня золотого оруденения, как и для подрудного, характерно повышенное содержание петрогенных Mn, Ti, и рассеянных V, Ni, Cu, Zn элементов, что свидетельствует о центробежном характере их распределения в крупнообъемном метасоматическом ореоле. Среднерудный уровень отличается ассоциацией элементов Co, Zn, As, P, что, прежде всего, связано с процессами гидротермального минералообразования и интенсивным привнесением данных элементов в ядерную часть месторождения.

Схема распределения уровней оруденения на месторождении по результатам дискриминантного анализа приведена на рис. 5. На дневной поверхности *надрудный* уровень картируется ореолом (группой проб), расположенным за пределами контура выхода рудного тела. Отсутствие ореола в западной части месторождения на ряде буровых линий обусловлено недостатком геохимических проб в данной области. Группа проб, характеризующая *среднерудный* уровень оруденения, образует ореол,

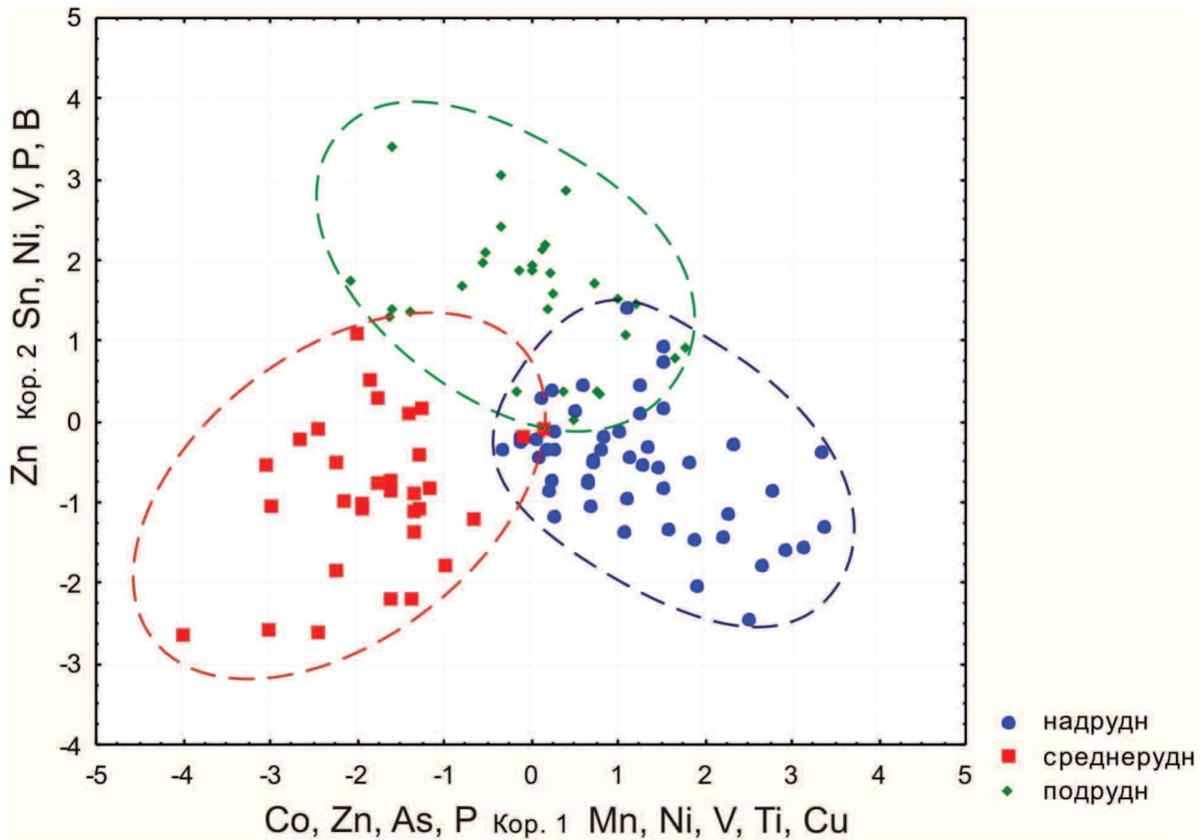


Рис. 4. Группировка секционных сколовых геохимических проб по результатам дискриминантного анализа

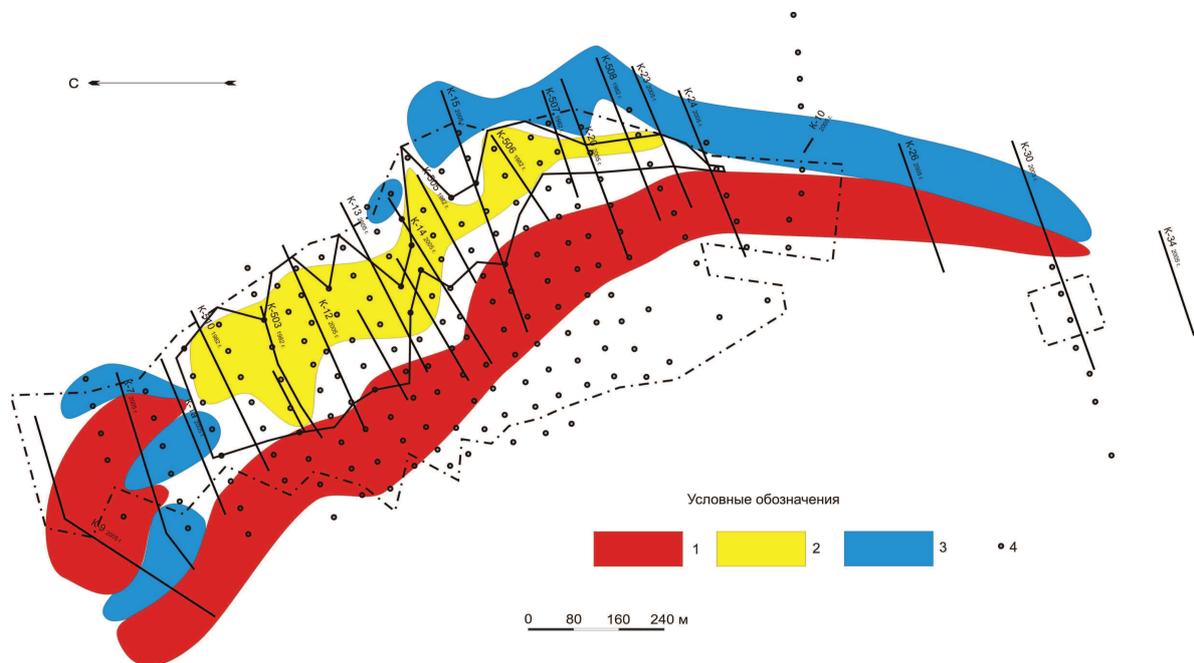


Рис. 5. Схема распределения уровней оруденения на дневной поверхности по результатам дискриминантного анализа. Уровни оруденения: 1 – надрудный, 2 – среднерудный, 3 – подрудный; 4 – разведочная скважина

пространственно совмещенный с выходом рудного тела на дневную поверхность. Подрудный уровень оруденения картируется лишь частично в связи с

ограниченным количеством горных выработок и скважин в восточной части месторождения, выходящих за пределы нулевого контура.

Таким образом, на дневной поверхности месторождения по выделенным группам проб картируются над-, среднерудный уровни оруденения и, частично, подрудный. Анализируя полученные результаты, можно констатировать, что методика выделения уровней оруденения по вторичным ореолам рассеяния может успешно применяться на площадях, перспективных для выявления и оконтуривания рудных объектов, выходящих на дневную поверхность.

Выводы

Проведенное исследование позволяет сделать следующие выводы:

1. По результатам дискриминантного анализа эталонные геохимические выборки по вторичным ореолам рассеяния, характеризующие над-, средне- и подрудный уровни золотого оруденения, четко выделились в осях многомерных канонических переменных.
2. Геохимические характеристики уровней оруденения существенно различны. Для надрудного

уровня золотого оруденения характерно повышенное содержание Mn, Ti, V, Ni, Cu, Zn. Среднерудный уровень характеризуется ассоциацией элементов Co, Zn, As, P. Подрудный уровень отличается повышенными значениями содержания более широкого комплекса элементов: Co, Zn, As, P, Mn, Ti, V, Ni, Cu, Zn, Sn, В.

3. Разделение массива геохимических проб, отобранных по вторичным ореолам рассеяния на основе отнесения их к эталонным выборкам (группам проб), позволило успешно выделить на площади месторождения три уровня оруденения.
4. На примере золоторудного месторождения Чертово Корято показана возможность применения дискриминантного анализа с целью картирования уровней оруденения на дневной поверхности. Картирование может проводиться как по вторичным ореолам рассеяния при проведении площадных поисково-оценочных работ, так и по первичным ореолам рассеяния – в объеме, занимаемом рудными телами.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Беус А.А., Григорян С.А. Геохимические методы поисков и разведки месторождений твердых полезных ископаемых. – М.: Недра, 1975. – 280 с.
2. Григорян С.А. Первичные геохимические ореолы при поисках и разведке рудных месторождений. – М.: Недра, 1987. – 407 с.
3. Инструкция по геохимическим методам поисков рудных месторождений. – М.: Недра, 1983. – 191 с.
4. Ворошилов В.Г. К вопросу о геометризации аномальных структур геохимических полей гидротермальных рудных месторождений // Известия Томского политехнического университета. – 2007. – Т. 311. – № 1. – С. 84–89.
5. Шестаков Ю.Г. Математические методы в геологии. – Красноярск: Изд-во Красноярского ун-та, 1988. – 208 с.
6. Петролого-геохимические черты рудовмещающего метасоматического ореола золоторудного месторождения Чертово Ко-

рыто (Патомское нагорье) / И.В. Кучеренко, Р.Ю. Гаврилов, В.Г. Мартыненко, А.В. Верховин // Известия Томского политехнического университета. – 2008. – Т. 312. – № 1. – С. 11–20.

7. Объемная геолого-геохимическая модель мезотермального золоторудного месторождения Чертово Корято (Патомское нагорье) / Р.Ю. Гаврилов, И.В. Кучеренко, В.Г. Мартыненко, А.В. Верховин // Известия Томского политехнического университета. – 2009. – Т. 315. – № 1. – С. 30–43.
8. Структура геохимического поля мезотермального золоторудного месторождения Чертово Корято (Северное Забайкалье) / Р.Ю. Гаврилов, И.В. Кучеренко, В.Г. Мартыненко, А.В. Верховин // Разведка и охрана недр. – 2010. – № 11. – С. 19–24.

Поступила 20.09.2013 г.

UDC 553.411.071:550.4

MAPPING OF VERTICAL GEOCHEMICAL ZONATION BY THE EXAMPLE OF GOLD FIELD CHERTOVO KORYTO (THE PATOM UPLAND)

Roman Yu. Gavrilov,

Cand. Sc., Tomsk Polytechnic University,
Russia, 634050, Tomsk, Lenin Avenue, 30. E-mail: GavrilovRY@ignd.tpu.ru

In order to determine the location of mineralization levels on the surface the geochemical data processing has been carried out on the secondary dispersion halos of mesothermal gold field Chertovo Koryto. Rock samples from surface mine openings and core of vertical exploration wells were in the base of investigation. The obtained analytical data were processed by means of the discriminant analysis based on «recognition of images». It was established that geochemical ranges of above-, middle- and below ore levels of a gold field have essential distinctions. As a result of division of the massif of geochemical samples on the basis of their classification as reference samples, three levels of mineralization were determined on the deposit area. The paper introduces the principal possibility of applying discriminant analysis for mapping gold mineralization levels.

Key words:

Gold, secondary dispersion halos, erosional truncation, mineralization levels, reference samples, discriminant analysis, mapping.

REFERENCES

1. Beus A.A., Grigoryan S.A. *Geokhimicheskie metody poiskov i razvedki mestorozhdeniy tverdykh poleznykh iskopaemykh* [Geochemical exploration methods for mineral deposits]. Moscow, Nedra Publ., 1975. 280 p.
2. Grigoryan S.A. *Pervichnye geokhimicheskie oreoly pri poiskakh i razvedke rudnykh mestorozhdeniy* [Primary geochemical haloes in ore deposit exploration]. Moscow, Nedra Publ., 1987. 407 p.
3. *Instruktsiya po geokhimicheskim metodam poiskov rudnykh mestorozhdeniy* [Instructions for geochemical methods of ore deposit exploration]. Moscow, Nedra Publ., 1983. 191 p.
4. Voroshilov V.G. *K voprosu o geometrizatsii anomalnykh struktur geokhimicheskikh poley gidrotermalnykh rudnykh mestorozhdeniy* [Geometrization of anomaly structures of hydrothermal ore deposit fields]. *Bulletin of the Tomsk Polytechnic University*, 2007, vol. 311, no. 1, pp. 84–89.
5. Shestakov Yu.G. *Matematicheskie metody v geologii* [Mathematical methods in geology]. Krasnoyarsk, Krasnoyarsk University Press, 1988. 208 p.
6. Kucherenko I.V., Gavrilov R.Yu., Martynenko V.G., Verkhazin A.V. *Petrologo-geokhimicheskie cherty rudovmeshchayushchego metasomaticheskogo oreola zolotorudnogo mestorozhdeniya Chertovo Koryto (Patomskoe nagore)* [Petro-geochemical characteristics of ore-hosting mesotomatic halo in Chertovo Koryto gold-ore deposit (The Patom upland)]. *Bulletin of the Tomsk Polytechnic University*, 2008, vol. 312, no. 1, pp. 11–20.
7. Gavrilov R.Yu., Kucherenko I.V., Martynenko V.G., Verkhazin A.V. *Obemnaya geologo-geokhimicheskaya model mezotermalnogo zolotorudnogo mestorozhdeniya Chertovo Koryto (Patomskoe nagore)* [3D geologic-geochemical model of mesothermal Chertovo Koryto gold-ore deposit (The Patom upland)]. *Bulletin of the Tomsk Polytechnic University*, 2009, vol. 315, no. 1, pp. 30–43.
8. Gavrilov R.Yu., Kucherenko I.V., Martynenko V.G., Verkhazin A.V. *Struktura geokhimicheskogo polya mezotermalnogo zolotorudnogo mestorozhdeniya Chertovo Koryto (Severnoe Zabaykale)* [Geochemical field structure of mesothermal Chertovo Koryto gold-ore deposit (North TransBaikal)]. *Razvedka i okhrana nedr*, 2010, no. 11, pp. 19–24.