Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2014. Т. 11. № 3. С. 140–156

Особенности минералогической зональности рудно-магматических систем, вмещающих кварцево-жильные месторождения золота (по материалам спутниковой спектрометрии)

В.И. Горный, С.Г. Крицук, И.Ш. Латыпов, А.А. Тронин

Санкт-Петербургский научно-исследовательский центр экологической безопасности РАН
Санкт-Петербург 197110, Россия
E-mail: v.i.gornyy@ecosafety-spb.ru

На примере открытого аридного района западной Африки исследованы возможности картографирования гидротермально-метасоматических изменений пород, сопровождающих процесс рудообразования кварцево-жильных месторождений золота. Исследования базируются на представлениях о рудно-магматических системах (РМС), содержащих эти месторождения. С позиции возможности выявления поисковых признаков порфировых РМС дистанционными методами выполнен анализ генетической модели таких РМС. Отмечено, что важнейшим признаком порфировых РМС является закономерная гидротермально-метасоматическая зональность горных пород. Поэтому целью настоящей статьи является исследование возможности спутниковой спектрометрии для картирования закономерной зональности околорудных изменений в РМС типа порфировых. Для этого использованы материалы спутникового спектрорадиометра ASTER. Выполнено визуальное тектоническое дешифрирование элементов РМС типа порфировых. Изучены возможности двух алгоритмов распознавания минералов по их эталонным спектрам: - метод соответствия спектральным образцам (Spectral feature fitting); - метод условной минимизации энергии (Constrained energy minimization). Выполнена безэталонная классификация наборов численных характеристик близости эталонных спектров минералов околорудных изменений пород с наблюденным. Выявлены прямая и обратная закономерные зональности гидротермально-метасоматических изменений пород в РМС, вмещающих кварцево-жильные месторождения золота. Предложены две гипотезы механизма формирования на дневной поверхности систем прямой и обратной зональности околорудных изменений. Показано, что уровень эродированности РМС определяет закономерную последовательность метасоматической зональности в РМС типа порфировых. Сформулированы дешифровочные признаки как для РМС перспективных на поиски кварцево-жильных месторождений золота, так и перспективных на поиски медно-порфировых месторождений.

Ключевые слова: золото, месторождение, рудно-магматическая система, изменения пород, зональность, спектр, спутник, спектрометрия, распознавание, закономерность, индикаторы.

Введение

Поиски кварцевожильных месторождений золота осложняются малыми размерами рудных тел - кварцевых жил, монокварцевых штоков и штокверков. В последние десятилетия развивается стратегия прогнозирования и поисков рудных месторождений, основанная на представлениях о рудно-магматических системах (РМС). РМС – это генетически тесно связанное множество рудных, магматических и сопряженных с ними метасоматических эндогенных образований определенного вещественного состава, имеющих конкретную морфологию, строение, структурное положение в земной коре, характер эволюции во времени и пространстве, стадийность развития (Игнатьев и др., 1979). Естественно, что с экономических позиций на первом этапе прогнозно-поисковых работ целесообразно выполнять поиски РМС, что облегчается ее закономерным строением и значительными пространственным размерам. В этом случае площадь поисков непосредственно рудного

тела ограничивается проекцией РМС на дневную поверхность. Одними из наиболее изученных РМС являются порфировые, модель которых приведена на *рис. 1*.

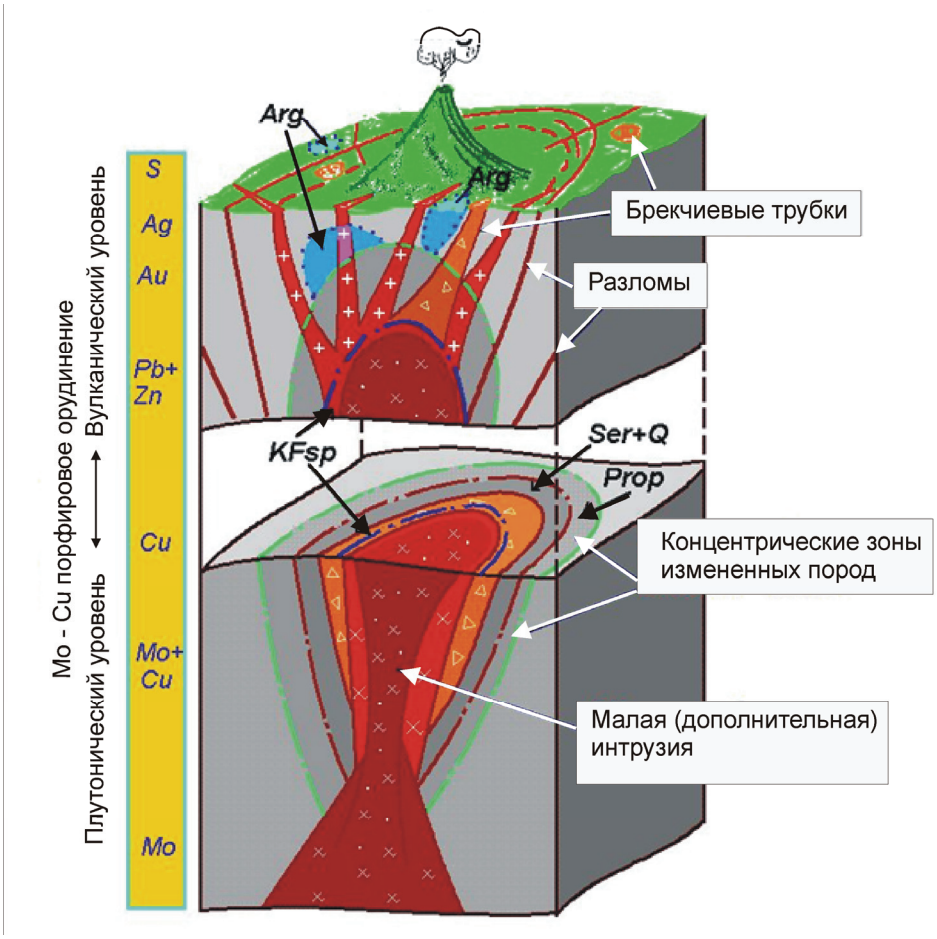

Рис. 1. Модель порфировой РМС (по И.Г. Павловой, 1983). Обозначения зон метасоматитов: KFsp – калишпатовых; Ser+Q – кварц-серицитовых; Arg - аргиллизитов и вторичных кварцитов; Prop – пропиллитов

Формирование порфировых РМС происходит в континентальных условиях в результате внедрения по тектонически ослабленным зонам порфировых тел (штоков, даек) диорит-гранодиорит-гранитового ряда, являющихся выступами, расположенных ниже промежуточных магматических очагов. Наиболее благоприятные для формирования месторождений интрузии, имеют площадь сечения ~ 0,5-2 км^2 (Павлова, 1978, 1983).

При остывании порфировых штоков вблизи их вертикальных границ возникает зона максимальных температурных градиентов, что создает условия для формирования гидротермальных систем и резко повышает вероятность после-магматического рудообразования в процессе отложения вещества в области геохимического температурного барьера (Сотников, 1983).

Характерной чертой РМС порфировых месторождений является наличие метасоматической зональности пород, возникшей в процессе формирования РМС (*рис. 1*).

Последовательность развития фаций метасоматических пород соответствует ряду: от ранних ортоклазовых, кварц-ортоклазовых, ортоклаз-биотитовых к серицит-кварцевым и кварцевым метасоматитам и далее к аргиллитам. Типичные порфировые РМС во всех случаях характеризуются присутствием кварц-серицитовых метасоматитов, ассоциирующихся с аргиллизитами, либо со вторичными кварцитами (Павлова, 1983).

Характерными минеральными компонентами зон гидротермально-метасоматических изменений в порфировых РМС являются:

- для зоны пропиллитов (Prop): щелочные полевые шпаты (альбит или адуляр), калиевая гидрослюда, хлорит, кварц, пирит, кальцит;
- для зоны аргиллизитов (Arg): глинистые минералы гидрослюдистого монтмориллонитового и хлоритового типов;
- для зоны вторичных кварцитов (Ser+Q): кварц, серицит, андалузит, алунит.

Верхняя часть РМС (*рис. 1*) соответствует вулканическому уровню магматической деятельности и рудообразования и может представлять собой стратовулкан с вторичными кварцитами. Для месторождений вулканического и субвулканического уровней магматизма характерны чрезвычайно интенсивные метасоматические изменения с широким развитием серицит-кварцевых метасоматитов. На таких месторождениях часто встречаются трубо- и дайкообразные брекчиевые тела, выполненные обломками вмещающих пород. Цемент брекчий представлен турмалином и кварцем. Верхняя (вулканическая и субвулканическая) часть РМС характеризуется кольцевой структурой рудных полей и коническо-кольцевыми системами дорудных трещин (Павлова, 1978; Основные типы …,1984). В верхних частях и на флангах порфировых РМС отмечается широкое развитие кварцевых жил и рудных штокверков, что считается их поисковым признаком (Павлова, 1978).

Главные рудные минералы медно-порфировых месторождений – пирит, халькопирит, молибденит, халькозин, энаргит, блеклая руда. На выходящих на поверхность рудных телах порфировых РМС наблюдается зона окисления (окислы железа и марганца) и вторичного обогащения руд.

Порфировые РМС характеризуются закономерной вертикальной элементной зональностью (*рис. 1*). В верхней, обогащенной кварцем части РМС, локализуются серебряные и золоторудные залежи. Таким образом, элементная специализация месторождений зависит от степени эродированности РМС. Например, слабо эродированные, как правило, в приповерхностной области контролируют месторождения серебра и золота. Более эродированные - свинца и цинка, а эродированные до плутонического уровня – меди и молибдена.

Таким образом, дешифровочные признаками порфировых РМС являются:

- иерархическая система кольцевых структур, отражающая мантийный диапир, промежуточный магматический очаг и малую (дополнительную) интрузию. Диаметр кольцевой структуры малой интрузии может быть в пределах ~ 1-2,5 км;
- штокообразные монокварцевые тела и широкое развитие крупных жиловидных кварцевых тел на флангах и в верхней части РМС;
- зональное размещение гидротермально-метасоматических изменений. Проявления турмалинизации, огипсования, ангидритизации, цеолитизации и др.;
- зоны окисления сульфидов (окислы железа и марганца) – железные шляпы, в том числе в пределах пиритовых ореолов во внешней области штокверков.

В последние годы наблюдается возрастающий интерес к применению спутниковой спектрометрии для картографирования в пределах рудных полей пространственного распределения минералов-индикаторов геологических обстановок, перспективных на выявление рудных месторождений (Abrams et al., 1985; Sabins, 1997; Spatz et al., 1994; Sabins, 1999; Watson et al., 1990; Bennett et al., 1993; Zhang et al., 2007; Tommaso et al., 2007; Moghtaderi et al., 2007; Choe et al., 2008; Rajesh, 2008; Тронин и др., 2011; Горный, Тронин, 2012). Следует отметить, что многие из этих работ базируются на применении материалов, полученных авиационными видеоспектрометрами, хотя наиболее доступными в настоящее время являются материалы съемок спектрорадиометром ASTER. Поэтому представляет интерес анализ возможностей материалов именно этого спектрорадиометра. Кроме того, как отмечено выше, наиболее эффективным подходом при прогнозно-поисковых работах на рудные полезные ископаемые является выявление признаков РМС, и особенно, закономерной зональности гидротермально-метасоматических изменений горных пород. В связи с недостаточной проработанностью этого вопроса целью настоящей статьи является изучение возможности применения материалов съемки спектрорадиометром ASTER (спутник Terra) для обнаружения закономерной зональности гидротермально-метасоматических изменений горных пород в РМС. В рамках настоящей статьи нами рассмотрены РМС, вмещающие кварцево-жильные золоторудные объекты.

Краткая геолого-географическая характеристика района исследований

Исследования выполнены на территории Буркина-Фасо (Западная Африка). По своим климатическим, физико-географическим условиям и разнообразию литологических и тектонических обстановок район является чрезвычайно благоприятным для разработки методик геологического применения дистанционных методов. Большое количество безоблачных дней в году определяет высокую вероятность получения кондиционных материалов спутниковой съемки. Территория Буркина-Фасо представляет собой плоскую равнину

(высоты, в основном, от 200 м до 350 м). Большая часть территории характеризуется малым проективным покрытием растительности, т.е. район исследований является «открытым» с высокой степенью обнаженности геологических комплексов.

В геологическом плане участок, на котором проведены исследования (*рис. 2*) расположен в краевой зоне зеленокаменного пояса Bormo-Goren, расположенного в пределах Западно-Африканского кратона (Project..., 2008).

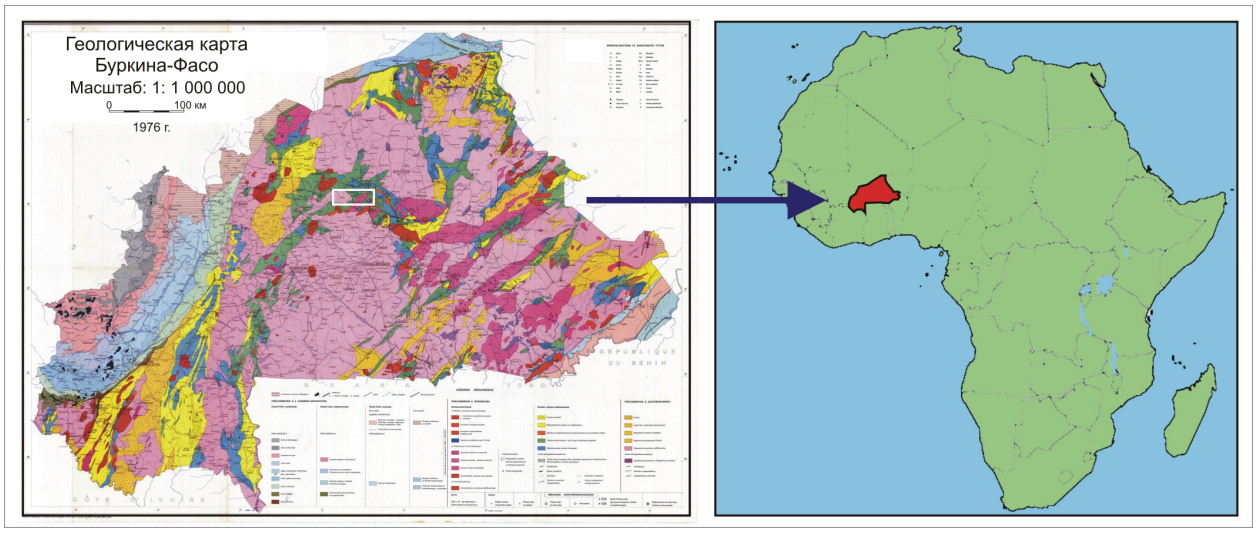

Рис. 2. Положение участка исследований (белый прямоугольник). Слева: Геологическая карта Буркина-Фасо. Авторы: G.Hottin, O.F.Ouedraogo. Издатель: Дирекция геологии и горнодобывающей промышленности Буркина-Фасо, 1976 г.

Палео-Протерозойский фундамент включает в себя Биримский вулкано-осадочный и плутонический комплекс, прорванный крупными батолитами гранитоидов. Фундамент перекрыт мелко и среднезернистыми сериями черных сланцев, граувакков, кварцитов и кремнистых отложений. Возраст вулканогенно-осадочных и плутонических пород составляет ~ 2,2 млрд. лет. Эти породы несогласно перекрыты кварцевыми и аркозовыми песчаниками и конгломератами сильно метаморфизированными до зеленокаменных комплексов, а в непосредственной близости от сдвиговых зон и гранитоидных интрузий - до амфиболитов.

В пределах Буркина-Фасо пояс Bormo-Goren контролирует большинство золоторудных объектов страны. Кроме того, там же известны месторождения свинца, цинка, меди, молибдена, железа, Реже встречаются проявления марганца, никеля, хрома, мышьяка.

Непосредственно на участке исследований представлены туфы кислого состава (сильно выветрелые до каолиновых сланцев почти белого цвета с многочисленными жилами кварца и рассеянных сульфидов, в частности, – пирита), туфы андезитов (выветрелые со следами кливажа в направлении складчатости), поверхностные отложения (латеритная кора, богатая железом с разной степенью цементации мощностью от 1 до 6 м). Гидротермальные изменения – существенны. Они представлены каолинизацией, окварце-

ванием, серецитизацией, карбонатизацией, хлоритизацией. Первичные сульфидные минералы полностью окислены до глубины 100 м – 120 м. Глубже находится переходная зона графитизации, ниже – зона сульфидных минералов.

На некотором удалении от участка исследований известно золоторудное месторождение представленное штокверком, сформированным кварцевыми жилами. В непосредственной близости от участка исследований вскрыта крупная золотоносная кварцевая жила, разрабатываемая старательским способом. Золото ассоциировано с пиритом и с окисленными минералами кварцевых прожилков.

Материалы и методы

На площадь, включающую участок исследований были получены материалы съемки спектрорадиометром ASTER, установленным на спутнике Terra и цифровая модель рельефа (ЦМР), подготовленная по результатам миссии Шаттл (Shuttle Radar Topography Mission – SRTM), геометрическое разрешение на местности 90 м, шаг по высоте 1,5 м. Характеристики спектрорадиометра ASTER приведены в *табл. 1* (ASTER User...).

Для визуального тектонического дешифрирования в нескольких вариантах были подготовлены цветовые композиты с наложенной ЦМР.

Визуальное тектоническое дешифрирование подготовленных цветовых композитов выполнялось по традиционной методике. Дешифрировались линейные зоны, индицирующие крупные тектонические нарушения, отдельные линеаменты, кольцевые структуры различных рангов.

Таблица 1. Технические характеристики спектрорадиометра ASTER

Техническая характеристика		***Значение***
Спектральные каналы:	Видимый диапазон (400 -750 нм)	2
	Ближний ИК (750-2500 нм)	7
	Тепловой ИК (2,5-25 мкм)	5
	Дополнительный канал	Ближний ИК
Разрешение на местности (Видимый/Ближний ИК/Тепловой диапазоны), м		15/30/90
Ширина полосы обзора, км		60
Число уровней квантования (Видимый/БИК/Тепловой диапазоны), бит		8/8/12
Дата съемки/ Время пересечения экватора		31.10.2003 г. / 10 ч:30 мин

Для картографирования минералов-индикаторов геологических обстановок, перспективных на выявление кварцево-жильных месторождений золота по данным съемки спутниковым спектрорадиометром ASTER в качестве основного использовался метод соответствия спектральным образцам (spectral feature fitting), известный также как «TRICORDER алгоритм» (Crowley et al., 1989; Clark et al., 1990). Алгоритм характеризуется высокой достоверностью распознавания минералов (при наличии спектральной особенности) и простотой численной реализации. Тем не менее, если мгновенное поле зрения спектрорадиометра покрыто различными минералами, то происходит смешение спектральных свойств различных минералов, сглаживающее спектральные особенности. В результате эффективность метода резко снижается. Поэтому для контроля, строились карты минералов-индикаторов по методу условной минимизации энергии (Constrained energy minimization) (Farrand & Harsanyi, 1997). Этот метод, также, позволяет оценить «сходство» спектра, полученного спектрорадиометром и спектра выбранного образца. Для этого строится линейный функционал, вычисляющий для произвольного спектра коэффициент сходства, причем искомый функционал строится таким образом, чтобы, во-первых, для спектра образца его значение было равно единице, и, во-вторых, для всего изображения сумма квадратов коэффициентов была минимальна. Недостатком этого метода является то, что, несмотря на нормировку, наибольшее значение вычисленного коэффициента «сходства» не ограничено единицей, из-за этого наиболее яркими на выходном изображении будут те пиксели, вектор-спектр которых коллинеарен спектру образца, но имеет большую длину.

Эталонные спектры минералов получены из спектральной библиотеки Геологической службы США шестой версии (*рис. 3*). В результате, для каждого минерала-индикатора строились карты расстояний между эталонным и измеренным спектрами.

Исходя из предположения, что информативными могут быть не отдельные минералы-индикаторы, а их ассоциации, выполнялось районирование территории на основе безэталонной классификации карт минералов-индикаторов методом нечетких множеств (fuzzy analysis). При этом в качестве количественной характеристики использованы расстояния между лабораторными спектрами и дистанционно измеренными спектрами каждого из минералов, полученными по методу «TRICORDER алгоритм».

Предварительный анализ показал, что минералы фаций гидротермально-метасоматических изменений горных пород (*рис. 4*) характеризуются спектральными особенностями (*рис. 4*), которые открывают возможности для их распознавания по материалам съемки спектрорадиометром ASTER. Для окончательного решения вопроса о возможности распознавания минералов-индикаторов лабораторные спектры были пересчитаны на уровень орбиты с учетом затухания излучения в атмосфере и аппаратных функций

спектрорадиометра ASTER. В результате, в *табл. 2* сведены воедино все спектральные особенности минералов фаций гидротермально-метасоматических изменений по каждому из поддиапазонов спектра электромагнитных волн.

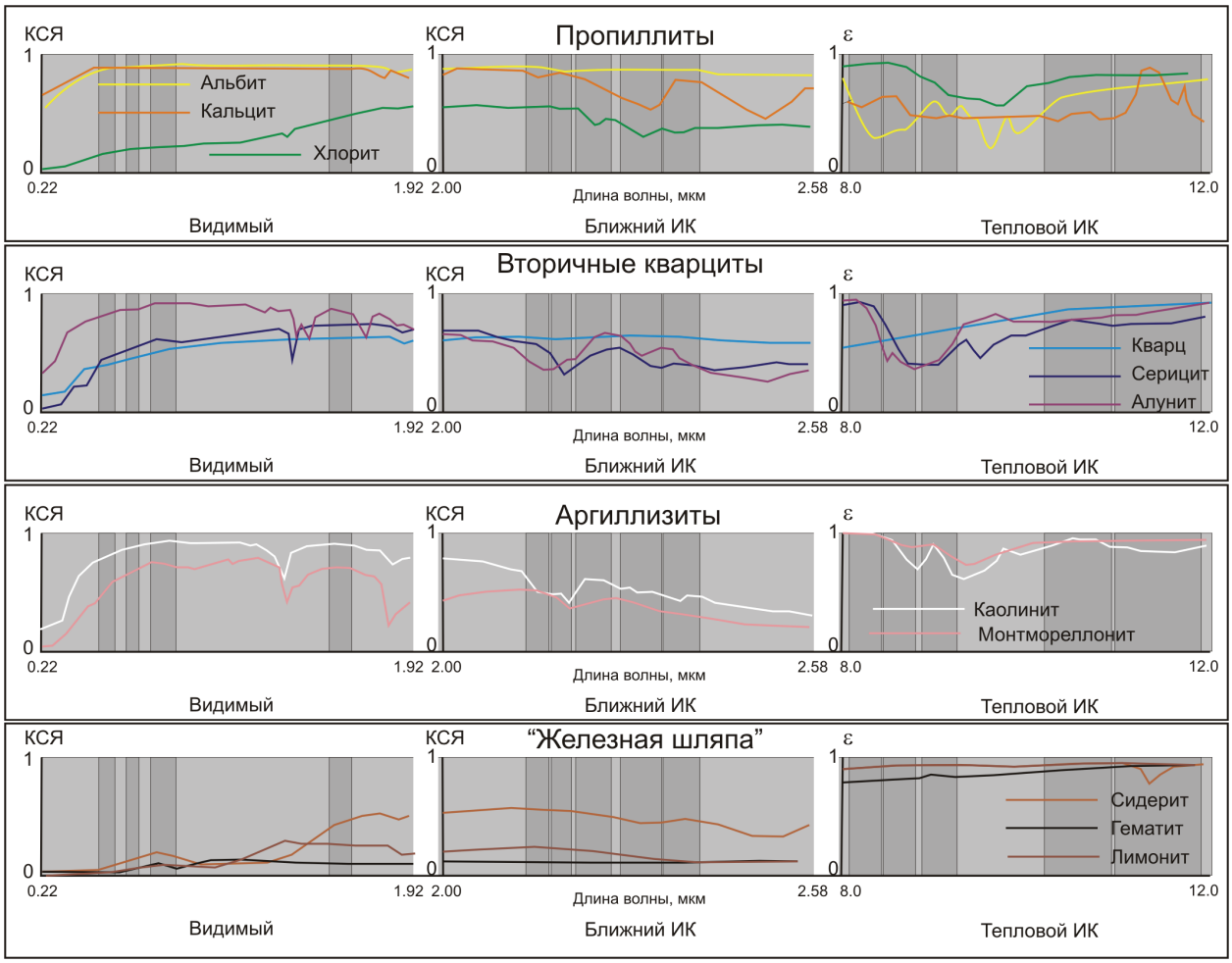

Рис. 3. Эталонные спектры минералов основных фаций околорудных изменений горных пород (http://speclab.cr.usgs.gov/spectral.lib06/) и из Lawrence et al., 2004)). Вертикальными темными полосами показаны спектральные интервалы ASTER

Рис. 4. Результаты визуального тектонического дешифрирования материалов съемки спектрорадиометром ASTER

Таблица 2. Прогнозируемая эффективность распознавания по спектральным особенностям минералов различных фаций гидротермально-метасоматических изменений горных пород по материалам съемки спектрорадиометром ASTER. (Наличие спектральных особенностей минералов в диапазонах показано цветом: 0,3–2,0 мкм — голубым, 2,0–2,6 мкм — зеленым, 8,0–12,0 мкм — светло-коричневым. В столбце «Локальные спектральные особенности» коричневым цветом отмечены минералы, имеющие спектральные особенности как в диапазоне 2,0–2,6 мкм, так и в диапазоне 8,0–12,0 мкм.)

Околорудные изменения	***Минералы***	***КСЯ 0.3—2.0 мкм***	***КСЯ 2.0—2.6 мкм***	***ИК тепловой диапазон, Коэфф. изл. 8.0-12.0 мкм***	***Локальные спектральные особенности***
Железная шляпа	Гематит, лимонит	0,05-0,28	0,12-0,25	0,92-0,97	Нет
	Сидерит	0,08-0,96	0,42-0,89	0,75-0,96	2,0 — 2,6 мкм - экстремум
Вторичные кварциты *Ser+Q*	Кварц	0,43-0,65	0,65	0,60-0,92	8-12 мкм - экстремум
	Мусковит, серицит	0,21-0,65	0,40-0,62	0,73-0,99	2,0 — 2,6 мкм и 8-12 мкм - экстремумы
	Алунит	0,45-0,92	0,18-0,82	0,72-0,97	2,0 — 2,6 мкм и 8-12 мкм - экстремумы
Пропиллиты *Prop*	Альбит	0,88-0,90	0,87-0,89	0,67-0,87	Экстремумы в ИК тепловом диапазоне
	Хлорит	0,21-0,80	0,40-0,62	0,73-0,99	2,0 — 2,6 мкм и 8-12 мкм - экстремумы
	Кальцит	0,08-0,96	0,42-0,89	0,75-0,96	2,0 — 2,6 мкм - экстремум
	Кварц	0,43-0,65	0,65	0,60-0,92	8-12 мкм - экстремум
	Эпидот	0,26-0,59	0,30-0,62	0,90-0,93	2,0 — 2,6 мкм - экстремум
Аргиллизиты *Arg*	Монтморил., каолинит	0,55-0,90	0,30-0,56	0,95-0,99	2,0 — 2,6 мкм - экстремум
Сульфиды	Галенит, пирит, халькопир.	0,10-0,48	0,08-0,25	0,64-0,94	Нет
	Сфалерит	0,10-0,48	0,08-0,25	0,64-0,94	2,0 — 2,6 мкм - экстремум

Анализ *табл. 2* показывает, что гидротермально-метасоматические изменения РМС типа порфировых, включающих кварцево-жильные месторождения золота, могут быть опознаны по материалам съемки спектрорадиометром ASTER.

При картографировании минералов индикаторов на всю площадь участка исследований по материалам спектрорадиометра ASTER была построена карта нормализованного вегетационного дифференциального индекса и на основе анализа гистограммы этого индекса была подготовлена маска растительности. В пределах замаскированных площадей картирование минералов не выполнялось.

Результаты

Визуальное тектоническое дешифрирование материалов съемки спектрорадиометром ASTER позволило выделить кольцевые структуры первого порядка диаметром ~ 25-30 км, кольцевые структуры второго порядка диаметром 10-15 км и кольцевые структуры третьего порядка диаметром несколько км (*рис. 4*). Было предположено, что кольцевые структуры первого порядка индицируют промежуточные магматические очаги, а второго и третьего порядков — дополнительные (малые) интрузии (см. *рис. 1*). Вместе с набором элементов (Ag, Au, Pb, Zn, Cu, Mo), характерных для различных уровней эродированности РМС типа порфировых это подтвердило предположение о наличии на исследуемой территории этих РМС.

Пример картографирования по материалам спектрорадиометра ASTER минералов характерных для фации вторичных кварцитов приведен на *рис. 5*. Следует отметить, что во многих случаях наблюдается перекрытие площадей, занятых различными минералами. На этом основании было сделано предположение о том, что из-за достаточно большого размера мгновенного поля зрения спектрорадиометра ASTER (*табл. 1*) в него попадают породы, в состав которых входят несколько минералов одной и той же метасоматической фации. Это должно приводить к сглаживанию спектральных различий между распознаваемыми минералами. Поэтому при дальнейшем анализе все распознанные минералы были объединены в несколько групп: - вторичных кварцитов; - пропиллитов; - аргиллизитов; - железосодержащих минералов (*рис. 6)*.

Визуальный анализ полученной карты (*рис. 6*) совместно с результатами тектонического дешифрирования (*рис. 4*) позволил предварительно отметить, что различные кольцевые структуры характеризуются разнообразными сочетаниями групп минералов и их пространственным расположением относительно самих кольцевых структур.

Далее, для облегчения визуального анализа было выполнено маскирование областей за пределами кольцевых структур третьего порядка. После чего методом нечетких

множеств была проведена безэталонная классификация, распознанных минералов (*рис. 7*). При этом, выявленные классы содержали наборы минералов, в которых последовательно в противофазе изменялось содержание кремнезема и железа. При этом, крайние члены полученного ряда наборов минералов содержали максимальное количество кремнезема и железа (см. легенду на *рис. 7*).

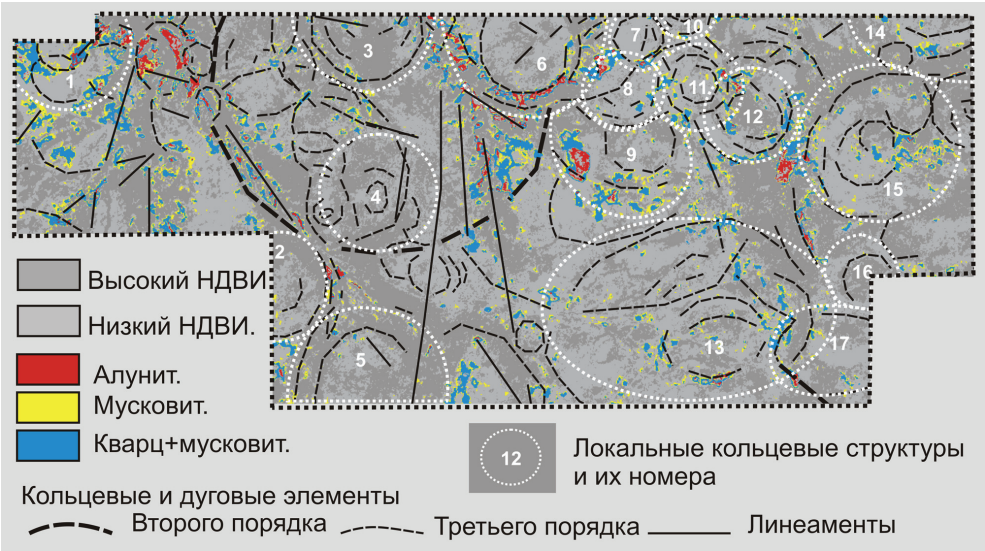

Рис. 5. Распределение минералов кварц-серицитовой фации гидротермально-метасоматических изменений пород по результатам обработки материалов съемки спектрорадиометром ASTER

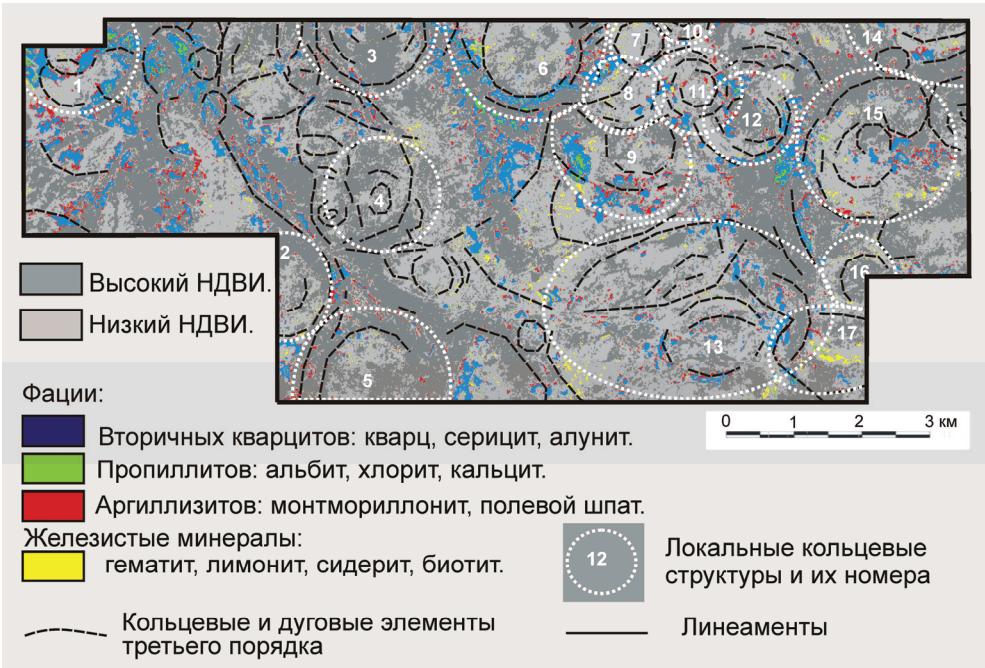

Рис. 6. Распределение фаций вторичных кварцитов, пропиллитов, аргиллизитов и железосодержащих минералов по результатам обработки материалов съемки спектрорадиометром ASTER

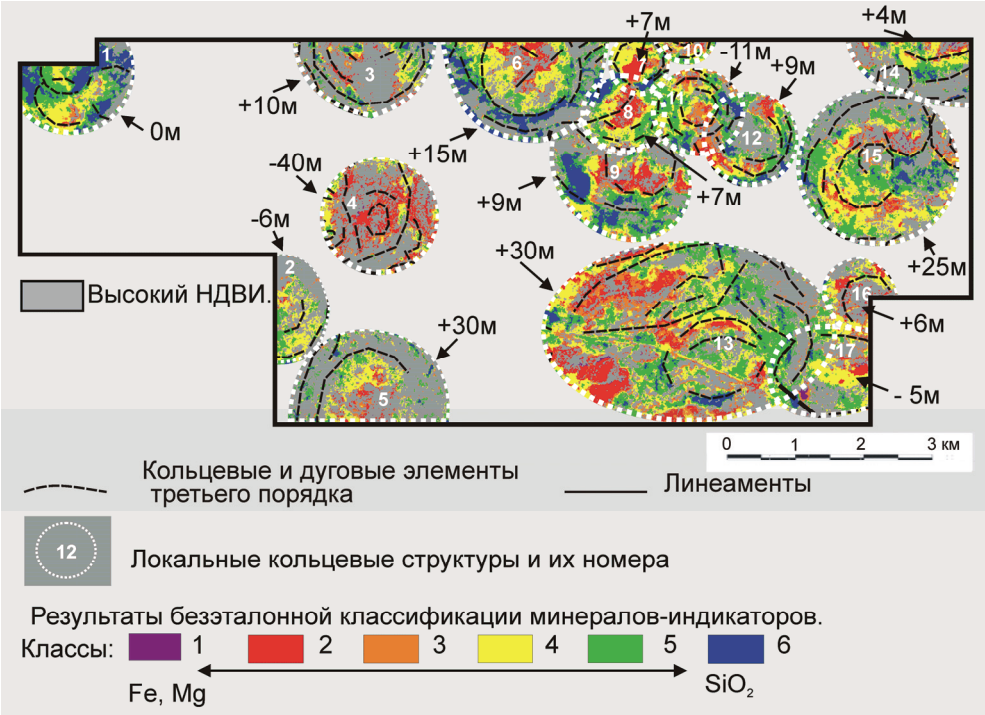

Рис. 7. Результаты безэталонной классификации методом нечетких множеств минимальных расстояний до эталонного спектра (метод соответствия спектральным образцам). Стрелками с цифрами указаны превышения (понижения) в рельефе в метрах центральной части структур над их периферической областью

Обсуждение результатов

Анализ полученной карты (*рис. 7*) показал, что наблюдаются как кольцевые структуры, у которых в центральной части преобладают породы содержащие кварц, а на периферии — минералы железа (далее будем называть подобную зональность - нормальной минералогической зональностью) (см. структуры 1, 13, 15 на *рис. 7*), так и структуры, у которых наблюдается обратная картина, т. е. в центре — минералы железа, а на периферии кварцсодержащие породы (далее будем называть подобную зональность — обратной минералогической зональностью) (см. структуры 4-9, 11, 16, 17 на *рис. 7*).

Для выявления возможных причин этих различий было сделано предположение о том, что такая картина может наблюдаться в результате сортировки обломочного материала при его сносе со склонов различных (положительных и отрицательных) форм рельефа. Ясно, что мелко обломочный и легко транспортируемый материал, например, латериты будет содержать больше железа, чем крупнообломочный материал, в котором будет значительное содержание кварца, как более устойчивого к эрозии минерала. Соответственно, если кольцевые структуры индицируют положительные формы рельефа, то следует ожидать, что будет наблюдаться нормальная минералогическая зональность. Если же

кольцевые структуры отражают отрицательные формы рельефа, то в центре должно быть больше железосодержащих минералов, а на периферии — кварцсодержащих пород.

Для проверки этой гипотезы был выполнен анализ цифровой модели рельефа в пределах кольцевых структур. Анализ показал, что для кольцевых структур с нормальной минералогической зональностью формы рельефа либо положительные (кольцевые структуры 13, 15 на *рис. 7*), либо поверхность плоская (кольцевая структура 1 на *рис. 7*). В то же время, для кольцевых структур с обратной минералогической зональностью (см. структуры 4-9, 11, 16, 17 на *рис. 7*) отсутствует какая-либо закономерность, связанная со знаком формы рельефа. Так, кольцевые структуры 4, 11, 17 (*рис. 7*) индицируют отрицательные формы рельефа, а кольцевые структуры 5, 6-9, 14, 16 — положительные. На этом основании был сделан вывод о том, что рельеф дневной поверхности не определяет, а, следовательно, и не является причиной формирования прямой и обратной минералогической зональности кольцевых структур, выявленных в пределах исследуемой площади.

В результате осталась единственная гипотеза предполагающая, что прямая и обратная минералогические зональности кольцевых структур определяются различным уровнем эрозии РМС. Например, если уровень эрозии соответствует самому верхнему - вулканическому уровню РМС (см. *рис. 1*), то в центре кольцевой структуры, индицирующей дорудные концентрические трещины вокруг малой дополнительной интрузии, должна наблюдаться изометрическая область интенсивного окварцевания, а на периферии — минералы железа, представляющие продукты окисления обширного пиритового ореола дополнительной интрузии. В данном случае, к кольцевым структурами с нормальной минералогической зональностью такого типа можно отнести структуры 1 и 15 (*рис. 7*). Таким образом, если выявляется кольцевая структура с нормальной минералогической зональностью, то следует ожидать в ее пределах проявлений золота и серебра.

При плутоническом уровне эродированности РМС следует ожидать, что окварцованные породы будут иметь форму кольцевой зоны, обрамленной с внешней стороны, а может быть и с обоих сторон железосодержащими минералами — продуктами окисления пиритового ореола. В данном случае таким характерным примером являются структуры 6 и 13 (*рис. 7*), где четко прослеживается кольцевая зона окварцевания. В результате может быть сделан вывод о плутоническом уровне эродированности РМС, индицируемых структурами 6 и 13 (*рис. 7*). А отсюда следует, что в пределах таких кольцевых структур с обратной минералогической зональностью следует ожидать проявлений свинца, цинка, меди, молибдена и в меньшей степени золота и серебра.

Заключение

Проведенные исследования позволяют сделать следующие выводы.

1. В контактной зоне зеленокаменного пояса Bormo-Goren (Буркино Фасо, Западная Африка) по результатам тектонического визуального дешифрирования выявлены системы кольцевых структур различного ранга, предположительно индицирующие мантийные диапиры, промежуточные очаги и дополнительные (малые) интрузии.

2. Метод минимального расстояния до эталонного спектра в приложении к материалам съемки спектрорадиометром ASTER позволяет надежно разделять только железосодержащие минералы и осветленные породы, обогащенные кварцем, альбитом, алунитом и кальцитом.

3. В пределах кольцевых структур третьего порядка отмечено закономерное пространственное разделение окварцованных горных пород и железосодержащих минералов, что интерпретировано как гидротермально-метасоматическая зональность, возникающая вокруг дополнительных (малых) интрузий в РМС типа порфировых.

4. Прямая и обратная минералогическая зональность отражают различные (вулканический-плутонический) уровни эродированности РМС типа порфировых и может являться дополнительным дешифровочным признаком для сформировавшихся в них кварцево-жильных месторождений золота.

5. Дешифровочными признаками вулканического уровня эродированности РМС благориятного для поисков кварцево-жильных месторождений золота являются:

- иерархическая система кольцевых структур первого (диаметр ~ 30 км), второго (диаметр 10 - 15 км) и третьего (диаметр - первые км) порядков;

- изометрическая область окварцованных пород в пределах кольцевой структуры третьего порядка, обрамленная ореолом железосодержащих минералов.

6. Дешифровочными признаками плутонического уровня эродированности РМС благориятного для поисков проявлений свинца, цинка, меди и молибдена являются:

- иерархическая система кольцевых структур первого (диаметр ~ 30 км), второго (диаметр 10 - 15 км) и третьего (диаметр - первые км) порядков;

- кольцевая область окварцованных пород в пределах кольцевой структуры третьего порядка, обрамленная либо снаружи, либо с обоих сторон ореолами железосодержащих минералов.

Литература

1. *Игнатьев А.Б.* Основные черты и типы рудно-магматических систем области вулканизма Дальнего Востока // Сб. Магматогенно-рудные системы. Владивосток: ДВНЦ СССР, 1979. С.22–29.
2. *Горный В.И., Тронин А.А.* Обзор достижений последнего десятилетия в области применения спутниковых методов дистанционного зондирования при геологических и геофизических исследованиях // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2012. Т. 9. № 5. С. 116–132.
3. *Павлова И.Г.* Геолого-генетические модели молибденовых порфировых месторождений // В кн. Генетические модели эндогенных рудных формаций. Т.1. Новосибирск: Наука. 1983. С. 127–135.
4. *Павлова И.Г.* Медно-порфировые месторождения (закономерности размещения и критерии прогнозирования). Л.: Наука, 1978. 275 с.
5. *Сотников В.И. и др.* Генетическая модель медно-молибденовой формации // В кн. Генетические модели эндогенных рудных формаций. Т.1. Новосибирск: Наука. 1983. С. 112–127.
6. *Основные типы рудных формаций.* Терминологический справочник. Под. Ред. Ю.А.Косыгина, Е.А.Кулиша. М.: Наука, 1984. 316 с.
7. *Тронин А.А., Горный В.И., Крицук С.Г., Латыпов И.Ш.* Спектральные методы дистанционного зондирования в геологии. Обзор // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2011. Т. 8, № 4, С. 23–38.
8. *Abrams M.J., Brown D., Silver Bell.* Arizona, porphyry copper test site: The Joint NASA-Geosat test case study, Section 4. Tulsa, OK: American Association of Petroleum Geologists. 1985. 73 p.
9. *Bennett S.A., Atkinson W.W., Kruse F.A*. Use of thematic mapper imagery to identify mineralization in the Santa Teresa District, Sonora, Mexico // Int. Geol. Rev. 1993. 35. P. 1009–1029.
10. *ASTER Users Handbook*. Version 1. Michael Abrams. Simon Hook. Jet Propulsion Laboratory. 4800 Oak Grove Dr. Pasadena, CA 91109. 135 p.
11. *Sabins F.F.* Remote Sensing — Principles and Interpretation, 3rd edn., W.H. Freeman, New York, NY.: 1997. 494 p.
12. *Choe E., van der Meer F., van Ruitenbeek F., van der Werff H., de Smeth B., Kim K.W.* Mapping of heavy metal pollution in stream sediments using combined geochemistry, field spectroscopy, and hyperspectral remote sensing: A case study of the Rodalquilar mining area, SE Spain // Remote Sensing of Environment. 2008. Vol. 112, P. 3222–3233.
13. *Clark R.N., King T.V.V., Kleijwa M., Swayze G.A. & Vergo N.* High spectral Resolution Reflectance Spectroscopy of Minerals // *J. Geophys. Res*. 1990. 95. P. 12653–12680.
14. *Crowley J.K., Brickey D.W. & Rowan L.C.* Airborne imaging spectrometer data of the Ruby mountains, Montana: mineral discrimination using relative absorption band-depth images // Remote Sens. Environ. 1989. No. 29, 989. P. 121–134.
15. *Farrand W.H. & Harsanyi J.C.* Mapping the distribution of mine tailings in the Coeur d'Alene River valley, Idaho, through the use of Constrained Energy Minimization Technique // Remote Sens.Environ. 1997. No 59. P. 64–76.
16. *Lawrence C. Rowan, Colin J. Simpson, John C. Mars.* Hyperspectral analysis of the ultramafic complex and adjacent lithologies at Mordor, NT, Australia // Remote Sensing of Environment. 2004. Volume 91, Issues 3–4. P. 419–431.
17. *Moghtaderi A., Moore F., Mohammadzadeh A.* The application of advanced space-borne thermal emission and reflection (ASTER) radiometer data in the detection of alteration in the Chadormalu paleocrater, Bafq region, Central Iran // Journal of Asian Earth Sciences. 2007. Volume 30, Issue 2. P. 238–252.
18. *Rajesh H.M*. Mapping Proterozoic unconformity-related uranium deposits in the Rockhole area, Northern Territory, Australia using landsat ETM+ // Ore Geology Reviews. 2008.Volume 33, Issues 3–4. P. 382–396.
19. *Resource Estimation Technical Report,* Ronguen Au Project, Burkina Faso. SRK Consulting. Project Reference Number: 3CG009.001 // Goldrush Resources Ltd. May 15, 2008. P. 91. http://goldrushresources.ca/wp-content/uploads/2011/05/ronguen_resource_est.pdf.
20. *Sabins F.F.* Remote sensing for mineral exploration // Ore Geology Reviews. 1999. 14. P. 157–183.
21. *Spatz D.M., Wilson R.T.* Exploration remote sensing for porphyry copper deposits, western America Cordillera // Proceedings Tenth Thematic Conference on Geologic Remote Sensing. Environmental Research Institute of Michigan. Ann Arbor, MI: 1994. P. 1227–1240.
22. T*ommaso I.D., Nora Rubinstein N.,* Hydrothermal alteration mapping using ASTER data in the Infiernillo porphyry deposit, Argentina // Ore Geology Reviews. 2007. Vol. 32, Issues 1–2, P. 275–290.
23. *Watson K., Kruse F.A., Hummer-Miller S.* Thermal infrared exploration in the Carlin trend, northern Nevada // Geophysics. 1990. vol. 55. P. 70–79.
24. *Zhang X., Pazner M., Duke N.,* Lithologic and mineral information extraction for gold exploration using ASTER data in the south Chocolate Mountains (California) // ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing. 2007. Vol. 62. Issue 4. P. 271–282.

Regularities of rock alteration assemblages of ore-magmatic systems containing quartz-vein manifestations of gold (by satellite spectrometry)

V.I. Gornyy, S.G. Kritsuk, I.Sh. Latypov, A.A. Tronin

Scientific Research Center for Ecological Safety RAS
St.-Petersburg 197110, Russia
E-mail: v.i.gornyy@mail.ru

Possibilities of rock alteration mapping of quartz-vein gold deposits were investigated. The arid, well exposed region of Western Africa was chosen as the test site. Our researches are based on the concept of ore-magmatic systems (OMS) containing quarts-vein gold deposits. The genetic model of porphyry OMS, as well as the possibility to map prospecting signs of such OMS by the modern measuring remote sensing methods were analyzed. We noticed that regular zones of hydrothermal rock alterations are one of the most important prospecting sign of porphyry OMS. That is why the main goal of this paper is to investigate the possibility to map the regular zones of hydrothermally altered rocks of porphyry OMS by satellite spectrometry. The Terra (ASTER) satellite data were used. Visual tectonic interpretation of porphyry OMS signs from different RGB color composites was done. Possibilities of two algorithms of mineral spectra recognition (Spectral feature fitting and Constrained energy minimization) were investigated. The fuzzy unsupervised classification of quantitative distance of spectra similarities was applied to map complexes of minerals. As a result, normal and inverted regular hydrothermally altered zones were mapped in porphyry OMS containing quarts-vein gold deposits. Two hypothesis were suggested to explain the mechanism of this regularity formation: - influence of positive and negative forms of land surface relief on the eroded material transportation; - level of OMS erosion (volcanic or plutonic). It was concluded that the level of OMS system erosion derives the normal or inverted type of zones. Additional prospecting indicators of OMS containing gold deposits of quartz-vein formation, as well as copper deposits, were formulated.

Key words: gold, deposit, ore-magmatic system, altered rocks, zones, satellite, spectrometry, recognition, regularities, indicators.

References

1. Ignat'ev A.B., Osnovnye cherty i tipy rudno-magmaticheskikh sistem oblasti vulkanizma Dal'nego Vostoka (Major features and types of ore-magmatic systems of Far East volcanic region), In: *Magmatogenno-rudnye sistemy* (Ore-magmatic systems), Vladivostok: DVNTs SSSR, 1979, pp. 22–29.
2. Gornyi V.I., Tronin A.A., Obzor dostizhenii poslednego desyatiletiya v oblasti primeneniya sputnikovykh metodov distantsionnogo zondirovaniya pri geologicheskikh i geofizicheskikh issledovaniyakh (Last decade achievements of satellite flown remote sensing methods on geological and geophysical investigations. Review*), Sovremennye problemy distantsionnogo zondirovaniya Zemli iz kosmosa,* 2012, Vol. 9, No. 5, pp. 116–132.
3. Pavlova I.G., Geologo-geneticheskie modeli molibdenovykh porfirovykh mestorozhdenii (Genetic geological models of molybdenum porphyry deposits*),* In: *Geneticheskie modeli endogennykh rudnykh formatsii* (Genetic models of endogenic mineral formations), Vol. 1, Novosibirsk: Nauka, 1983, pp. 127–135.
4. Pavlova I.G., *Medno-porfirovye mestorozhdeniya (zakonomernosti razmeshcheniya i kriterii prognozirovaniya)* (Copper-porphyry deposits (regularities of location and forecasting criterion), Leningrad: Nauka, 1978, 275 p.
5. Sotnikov V.I. i dr., Geneticheskaya model' medno-molibdenovoi formatsii *(*Genetic model copper porphyry formation*),* In: *Geneticheskie modeli endogennykh rudnykh formatsii* (Genetic model of endogenic mineral formations), Vol. 1, Novosibirsk: Nauka, 1983, pp. 112–127.
6. *Osnovnye tipy rudnykh formatsii. Terminologicheskii spravochnik* (Main types of mineral formations. Terminology directory), Ed.: Yu.A.Kosygin, E.A.Kulisha, Moscow: Nauka*,* 1984, 316 p.
7. Tronin A.A., Gornyi V.I., Kritsuk S.G., Latypov I.Sh., Spektral'nye metody distantsionnogo zondirovaniya v geologii. Obzor (Remote spectrometry in geology. Review*), Sovremennye problemy distantsionnogo zondirovaniya Zemli iz kosmosa,* 2011, Vol. 8, No. 4, pp. 23–38.
8. Abrams M.J., Brown D., Silver Bell., *Arizona, porphyry copper test site: The Joint NASA-Geosat test case study, Section 4*, Tulsa, OK: American Association of Petroleum Geologists, 1985, 73 p.

9. *ASTER Users Handbook,* Version 1, Ed: Michael Abrams, Simon Hook, Jet Propulsion Laboratory, 4800 Oak Grove Dr., Pasadena, CA 91109, 135 p.
10. Bennett S.A., Atkinson W.W., Kruse F.A., Use of thematic mapper imagery to identify mineralization in the Santa Teresa District, Sonora, Mexico, *Int. Geol. Rev.,* 1993, 35, pp. 1009–1029.
11. Choe E., van der Meer F., van Ruitenbeek F., van der Werff H., de Smeth B., Kim K.W., Mapping of heavy metal pollution in stream sediments using combined geochemistry, field spectroscopy, and hyperspectral remote sensing: A case study of the Rodalquilar mining area, SE Spain, *Remote Sensing of Environment,* 2008, Vol. 112, pp. 3222–3233.
12. Clark R.N., King T.V.V., Kleijwa M., Swayze G.A. & Vergo N., High spectral Resolution Reflectance Spectroscopy of Minerals, *J. Geophys. Res*., 1990, 95, pp. 12653–12680.
13. Crowley J.K., Brickey D.W. & Rowan L.C., Airborne imaging spectrometer data of the Ruby mountains, Montana: mineral discrimination using relative absorption band-depth images, *Remote Sens. Environ*, 1989, No 29, 989, pp. 121–134.
14. Farrand W.H. & Harsanyi J.C., Mapping the distribution of mine tailings in the Coeur d'Alene River valley, Idaho, through the use of Constrained Energy Minimization Technique, *Remote Sens. Environ,* 1997, Vol. 59, No. 1, pp. 64–76.
15. Lawrence C. Rowan, Colin J. Simpson, John C. Mars*,* Hyperspectral analysis of the ultramafic complex and adjacent lithologies at Mordor, NT, Australia, *Remote Sens. Environ.,* 2004, Vol. 91, (3), pp. 419–431.
16. Moghtaderi A., Moore F., Mohammadzadeh A., The application of advanced space-borne thermal emission and reflection (ASTER) radiometer data in the detection of alteration in the Chadormalu paleocrater, Bafq region, Central Iran, *Journal of Asian Earth Sciences*, 2007, Volume 30, Issue 2, pp. 238–252.
17. Rajesh H.M., Mapping Proterozoic unconformity-related uranium deposits in the Rockhole area, Northern Territory, Australia using landsat ETM+, *Ore Geology Reviews*, 2008,Vol. 33, Issues 3–4, pp 382–396.
18. *Resource Estimation Technical Report, Ronguen Au Project, Burkina Faso,* SRK Consulting, Project Reference Number: 3CG009.001, Goldrush Resources Ltd, May 15, 2008, p. 91, available at: http://goldrushresources.ca/wp-content/uploads/2011/05/ronguen_resource_est. pdf.
19. Sabins F.F., Remote sensing for mineral exploration, In: *Ore Geology Reviews,* 1999, 14, pp. 157–183.
20. Sabins F.F., *Remote Sensing — Principles and Interpretation*, 3rd edn., W.H. Freeman, New York, NY, 1997, 494 p.
21. Spatz D.M., Wilson R.T., Exploration remote sensing for porphyry copper deposits, western America Cordillera, *Proceedings Tenth Thematic Conference on Geologic Remote Sensing,* Environmental Research Institute of Michigan, Ann Arbor, MI, 1994, pp. 1227–1240.
22. Tommaso I.D., Nora Rubinstein N., Hydrothermal alteration mapping using ASTER data in the Infiernillo porphyry deposit, Argentina, *Ore Geology Reviews,* 2007, Vol. 32, Issues 1–2, pp. 275–290.
23. Watson K., Kruse F.A., Hummer-Miller S, Thermal infrared exploration in the Carlin trend, northern Nevada, *Geophysics,* 1990, Vol., 55, pp. 70–79.
24. Zhang X., Pazner M., Duke N., Lithologic and mineral information extraction for gold exploration using ASTER data in the south Chocolate Mountains (California), *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing,* 2007, Vol. 62, Issue 4, pp. 271–282.