Литосфера, 2008, № 1, с. 77-89

УДК 548.4:553.24

ВЕРТИКАЛЬНАЯ МЕТАСОМАТИЧЕСКАЯ ЗОНАЛЬНОСТЬ И ЕЕ ЗНАЧЕНИЕ ДЛЯ ПРОГНОЗИРОВАНИЯ СЛЕПОГО ОРУДЕНЕНИЯ И ОЦЕНКИ ПЕРСПЕКТИВ ОТРАБАТЫВАЕМЫХ МЕСТОРОЖДЕНИЙ НА ГЛУБИНУ (НА ПРИМЕРЕ ЗОЛОТОРУДНЫХ И ЗОЛОТОПОЛИМЕТАЛЛИЧЕСКИХ МЕСТОРОЖДЕНИЙ)

В.Н. Сазонов*, В.Н. Огородников*, Ю.А. Поленов**
**Институт геологии и геохимии УрО РАН*
620151, г. Екатеринбург, Почтовый пер., 7
E-mail: sazonov@igg.uran.ru
***Уральский государственный горный университет*
620144, г. Екатеринбург, ул. Куйбышева, 30
E-mail: polenov@usmga.ru
Поступила в редакцию 25 июня 2007 г.

Показано, что тела метасоматитов – продукты кислотного выщелачивания – имеют концентрически-зональное строение и являются конвергентными образованиями по своей природе. Вертикальная метасоматическая зональность ореолов околорудных изменений определяется их концентрически-зональным строением, что доказывается выклиниванием по вертикали зон метасоматических тел, и, кроме того, дифференциальным распределением (в вертикальной плоскости) минералов метасоматитов и их оптических параметров, а также ряда петрогенных (в первую очередь Al) и рудообразующих (в частности Au и его элементы-спутники) элементов. В основу исследования положены данные, полученные на уральских золоторудных (кварц-жильного типа) и золото-полиметаллических месторождениях. Кроме того, использованы опубликованные материалы по проблеме. На всех задействованных объектах установлено концентрическое строение ореолов околорудных изменений, что, кроме выклинивания зон метасоматитов по вертикали (вверх и вниз), подтверждается следующими данными: изменением количественных соотношений минералов в одной и той же зоне метасоматитов в вертикальной плоскости; вариацией свойств (железистость, модификация и др.) и состава минералов, а также форм нахождения в них химических элементов; изменением набора элементов-спутников золота с глубиной. Возникновение зональности удовлетворительно объясняется с позиций кислотно-основной дифференциации гидротерм. При этом главными параметрами, определяющими ее, являются взаимосвязанные T и pH, вполне определенным образом варьирующие в вертикальной плоскости тел метасоматитов. В комплексе приведенные составляющие вертикальной метасоматической зональности дают возможность определить степень эродированности месторождений и, следовательно, их перспективности на глубину. Естественно, что эти уровни могут использоваться при поисках слепого оруденения.

Ключевые слова: *вертикальная зональность, элементы зональности, концентрическое строение тел метасоматитов, поиски слепого оруденения, оценка перспектив эксплуатируемых месторождений, глубинность оруденения.*

VERTICAL METASOMATIC ZONATION AND ITS SIGNIFICANCE FOR PROGNOSIS OF BLIND DEPOSITS AND ESTIMATE IN THE DEPTH OF EXSPLORATION DEPOSITS (ON THE EXAMPLE OF GOLD AND GOLD-POLYMETALLIC DEPOSITS)

V.N. Sazonov*, V.N. Ogorodnikov*, Yu.A. Polenov**
**Institute of Geology and Geochemistry, Urals Branch of RAS*
***Urals State Mining University*

Concentric zonation and convergence nature of the metasomatic bodies are shown in the paper. A metasomatic zonation was singled out in the Uralian gold and gold-polymetallic deposits. The concentric structure of the metasomatic bodies is confirmed by: the evolution of quantitative mineral's ratio in a vertical flatness of the same metasomatic zone; the mineral's parameters variation; the mineral's

composition and the pattern of finding chemical elements in them; the change of the gold elements-satellites collection with depths. The genesis of all elements of metasomatic zonation finds a good explanation on the way of hydrotherm acidic-basic differentiation. This is determined by two main parameters (T, pH) regularity vary into vertical flatness. All elements of metasomatic zonation are the basis for successful prospecting of being developed deposits in the depth, and searching of the blind ore bodies.

Key words: *vertical zonation, elements of zonation, concentric construction of metasomatic bodies, prognosis of blind ore bodies, estimate of being developed deposits in the depth.*

Проблема вертикальной метасоматической зональности важна как в теоретическом (необходимость выявления эволюции PTX-параметров системы с глубиной, pH и Eh гидротермального раствора, а также характера трансформации состава эдуктов), так и в практическом (по сути, эта зональность является одним из важнейших поисковых признаков слепого оруденения, а также используется для определения уровня эрозии рудных тел) аспектах. Изучать такую зональность сложно из-за того, что ее развитие определяется многими параметрами (главные из них только что перечислены) и является длительным и полистадийным. Кроме того, эта зональность нередко затушевывается продуктами наложенных метасоматических и др. процессов (например, на Урале известно развитие березитов и грейзенов по скарнам [Месторождения…, 2001, и др.]).

С 80-х годов XX в. горнодобывающая промышленность стала ориентироваться на крупнообъемные месторождения, которые отличаются сравнительно бедными рудами, но зато большими запасами [Крупные…, 2004; Коротеев, Сазонов, 2005, и др.]. На сегодня ситуация в уральском регионе в связи с этой проблемой сложилась следующим образом. Существенная часть месторождений полезных ископаемых, особенно выходящих на дневную поверхность, найдена. Произошло это не без помощи ореолов околорудных изменений. Причем до указанного выше периода использовалась главным образом зональность метасомати-

Рис. 1. Зональное строение (в вертикальных срезах) тел березитизированных-лиственитизированных пород аметистового (а), золоторудных (б-е), медно-кобальтового (ж), золотополиметаллического (з) месторождений и поведение золота в разноглубинных горизонтальных сечениях Быньговского месторождения (б). По [Сазонов, 1980] с упрощениями.

1 – гранит; 2 – плагиогранит; 3 – андезит; 4 – андезибазальт; 5 – долерит; 6-9 – зоны метасоматитов: внешняя (6), промежуточная (7), внутренняя (8), минерализованная внутренняя (9); 10 – кривые распределения Au (показаны наиболее характерные на примере Быньговского месторождения, полный их спектр см. в цитированной работе (с. 161); а-з – месторождения: а – Ватиха, б, в – Быньговское (б – по данным Р.О. Берзона), г – Березовское, д – Крылатовское, е – Кочкарское, ж – Пышминско-Ключевское, з – Муртыкты. В телах метасоматитов (а-е) в пределахвнутренней (главным образом) и промежуточной зон развиты осевые кварцевые жилы, которые в принятом масштабе объектов отобразить не удалось.

Рис. 2. Строение (в вертикальном поперечном разрезе) ореола березитизации-лиственитизации в различных породах Промежуточной рудоносной зоны золотополиметаллического месторождения Муртыкты. По данным А.П. Бахтиной и В.Н. Сазонова [Сазонов, 2000].

1-4 – метасоматиты внешней зоны (Хл + Аб + Дл + Се + Кв) по туфам андезитового состава (1), кремнистым туффитам (2), андезитам (3), кремнекислым вулканитам (4); 5 – рудные тела; 6 – метасоматиты промежуточной зоны (Аб + Кв + Дл + Се)(здесь и далее в подрисуночных подписях: Хл – хлорит, Аб – альбит, Дл – доломит, Се – серицит, Кв – кварц, КПШ – калишпат, Анк – анкерит); 7, 8 – метасоматиты сопряженного осаждения: кальцитовые (7), хлоритовые (8); 9 – скважины.

тов названных ореолов в горизонтальной плоскости. В настоящее время ситуация резко изменилась: большая часть крупных месторождений известных генотипов уже выявлена (найти сейчас на Урале золоторудное месторождение кварц-жильного типа, по масштабам сопоставимое с Березовским, невозможно при современном уровне изученности территории), следовательно, необходимо развивать «теоретические» разработки для практического выделения (установления) оруденений новых промышленно-генетических типов. Поскольку «новые» объекты будут главным образом слепыми, постольку при поисках первостепенная роль будет принадлежать зональности тел метасоматитов в вертикально плоскости. Сказанным обусловливается необходимость рассмотреть состояние изученности вертикальной метасоматической зональности. Ниже мы попытаемся это сделать, опираясь на работы [Бахтина, Сазонов, 1980; Сазонов, 1980, 1984, 1998, 2000; Проблемы…, 1982; Чекваидзе, 1982; Миляев и др., 1994; Рафаилович, Алексеева, 1996; Месторождения…, 2001; Рафаилович и др., 2003, и др.].

Предварительно заметим, что горизонтальная метасоматическая зональность (конкретных горизонтальных сечений тел околорудно измененных пород) издавна используется в качестве поискового признака на Au, Ag, W, Sb, Hg, аметист и др.), а также как одна из важных основ (с 30-х годов XX в.) при прогнозировании и металлогенических построениях. Цель настоящей статьи – подвести итоги изучения вертикальной метасоматической зональности ореолов околорудно измененных пород на примере главным образом гумбеитовой, эйситовой, березит-лиственитовой, кварц-серицитовой и аргиллизитовой формаций. Довольно полная сводка по ним по Уральскому региону приведена в работах [Сазонов, 1980; Месторождения…, 2001].

В последние 3 десятилетия получены новые данные [Сазонов, 2000], послужившие основой для решения генетических, прогностических и ряда других вопросов (в частности ка-

Рис. 3. Строение ореола березитизации-лиственитизации (модальный вертикальный поперечный разрез) Васильковского золоторудного месторождения (северная окраина Кокчетавской глыбы, Казахстан). По [Миляев и др., 1994] с изменениями.

1, 2 – интрузивные массивы кислого (1) и средне-основного (2) составов; 3-5 – зоны метасоматического ореола: 3 – внешняя (Кв+Хл+Се+Аб+КПШ), 4 – промежуточная (Хл+Анк+КПШ) и внутренняя (Кв+Анк+Се или Се+Кв); 6 – рудное тело; 7, 8 – надрудные метасоматиты хлоритового (7) и альбит-хлоритового (8) составов; 9 – нижне-рудно-подрудная калишпатовая зона; 10 – первичный контакт между интрузиями различных составов; 11 – уровень современного эрозионного среза.

сающихся латеральной и вертикальной зональности метасоматитов) околорудного метасоматоза. Наиболее важными из них, как нам представляется, являются следующие.

1. Подтверждено представление о возможности взаимопереходов между формациями метасоматитов, образующихся в относительно близких физико-химических условиях под воздействием флюидов, имеющих подобную или одинаковую геохимическую, включая летучие компоненты (F, Cl, CO_2, S и др.), специализацию. Идейная основа такого заключения – конвергентность метасоматитов (например аргиллизитов, кварц-серицитов, березитов-лиственитов), возможность формироваться в РТХ-условиях не только одной формации. Конвергентность метасоматитов является одной из их характернейших черт [Рундквист, Павлова, 1974; Сазонов, 1998].

2. Установлено, что ореолы околорудно измененных пород имеют концентрически-зональное строение [Сазонов, 1980, 1984; Проблемы…, 1982; Чекваидзе, 1982, и др.], что проиллюстрировано в настоящей работе рис. 1-7. На примерах некоторых петрогенных (Al, Ca, Mg и др.) и рудных (Au, Ag и некоторые другие элементы-спутники Au) показано, что в разноуровневых горизонтальных срезах ореолов околорудно измененных пород они ведут себя по-разному: в одних инертны, в других вполне подвижны (привносятся или выносятся, иногда существенно) [Сазонов, 1998, 2000]. Обычно перечисленные элементы выносятся под и над внутренней зоной ореолов околорудных изменений, а участки их концентрирования располагаются в интервале развития внутренней зоны. На примере березит-лиственитовой формации показано, что это с учетом направленного (по вертикали) изменения минерального состава (по набору и количеству фаз) представляющих их метасоматитов (снизу вверх нарастает суммарное количество слюды и кварца и уменьшается – карбоната) можно использовать для прогнозирования минерального типа золоторудных месторождений, фаций глубинности оруденения, величины эрозионного среза рудных тел. Примеры успешной реализации такой методики даны в [Сазонов, 1980, 1984]. Заметим, что она приложима ко всем стадиям геологоразведочных работ, а также может использоваться при прогнозировании оруденения на глубину.

На некоторых золоторудных месторождениях Урала и других регионов (Муртыкты, Дальнее, Мурунтау, Балей и др., рис. 2, 3, 5, 7) наряду с околорудными метасоматитами выде-

лены их сорудные разности, состоящие из хлорита, хлорита и кальцита, хлорита и альбита, хлорита и парагонита, серицита модификации 1М. Подобные метасоматиты развиты и на колчеданно-полиметаллических месторождениях ([Проблемы…, 1982; Чекваидзе, 1982], рис. 4).

3. Крупные рудные месторождения являются обычно полигенными и полихронными. Для них характерно сложное строение литогеохимических ореолов околорудных изменений (рис. 3-6, 8). Их зональность является интегральной, продуктом всех этапов и стадий развития месторождений. При этом, если разновременные метасоматиты совмещены в одной и той же структуре без пересечений, то их зональное строение расшифровывается с большим трудом, обычно только с использованием современных методов изучения минерального вещества. Примеры метасоматических тел с совмещенной метасоматической зональностью приведены в [Сазонов, 1998].

4. Составом (точнее кремнекислотностью-основностью) вещественных комплексов, типоморфных для каждой конкретной геодинамической обстановки, определяется набор генетических типов месторождений и сопутствующих им метасоматитов (формационных типов). Глубинностью развития гидротермального процесса, обусловленного конкретным вещественным комплексом, а также такими параметрами состояния системы, как P, T, X, pH, Eh, определяется тип метасоматитов [Проблемы…, 1982; Сазонов, 1998, и др.].

Из материалов, полученных на уральских золоторудных месторождениях, а также некоторых других регионов (Центральный и Западный Казахстан, Западный Узбекистан, Забайкалье, Северо-Восток РФ и др.), вытекает, что крупным объектам сопутствуют, как правило, метасоматиты не менее чем двух формаций (рис.3, 4, 6). Месторождения полезных ископаемых, сопровождающиеся рассматриваемыми нами метасоматитами (гумбеитами, эйситами, березитами-лиственитами, кварц-серицитовыми метасоматитами, аргиллизитами), локализуются преимущественно в пределах шовных зон, в местах развития в последних дробления и рассланцевания. В таких местах, естественно, располагаются и магматиты, в том числе и продуцировавшие перечисленные и другие метасоматиты. Понятно, что сегодня предстоит иметь дело с поисками слепых и перекрытых месторождений. Также понятно, что в таких условиях определяющей при поисках становится вертикальная метасоматическая зональность в комплексе с вертикальной дифференциацией рудных элементов-спутников золота. В связи с этим, ниже рассмотрим состояние изученности этой зональности на примере уральских золоторудных месторождений и возможности ее практического использования. Естественно, что при этом будет учитываться опыт изучения этой проблемы в других регионах.

Рис. 4. Типы строения (в вертикальном разрезе) ореолов околорудно измененных пород на колчеданно-полиметаллических месторождениях: нетелескопированных (А) и телескопированных (Б). По [Чекваидзе, 1982].

1 – породы рудовмещающей вулканогенно-осадочной толщи; 2 – тела субвулканических диоритов; 3-5 – метасоматиты: кислотного выщелачивания (3), осаждения (4), синрудные (5); 6 – массивные рудные тела; 7 – прожилково-вкрапленное оруденение.

АКБАКАЙ

ВАСИЛЬКОВСКОЕ

БАКЫРЧИК

Вертикальная зональность в телах околорудно измененных пород проявляется в концентрическом строении ореолов околорудных изменений (имеется в виду зональность в их вертикальных сечениях, которая охарактеризована при рассмотрении березит-лиственитовой формации [Сазонов, 1980, 1984], (итоговые данные сконцентртрованы на рис. 1, а также рис. 2-7). Ее существование подтверждено изменением количественных соотношений минералов в одной и той же зоне метасоматитов по вертикали; изменением свойств (железистости, модификации), состава минералов, а также форм нахождения в них химических элементов; изменением набора элементов-спутников золота с глубиной; последнее наиболее полно изучено в Казахстане и представлено в [Рафаилович, Алексеева, 1996; Рафаилович и др., 2003] в виде эволюционных рядов (элементы перечисляются в порядке увеличения глубины): Hg, Sb, Ag, Pb, Te (0-0,5 км) → Sb, Ba, As, Ag, Pb (0,5-1,0 км) → As, Ba, Ag, Pb, Zn (1,0-1,5 км) → As, Sb, Ag, Bi, (1,5-2,0 км) → As, Bi, Cu, Co (2-3 км) → Cu, Co, Ni, As (3-4 км) (рис. 6-8). В целом эти ряды корреспондируются с таковыми, выделенными на уральских золоторудных месторождениях – Воронцовском, Светлинском, Березовском, Крылатовском, Астафьевском и др. [Сазонов, 1998; Месторождения…, 2001].

До 70-х годов XX в. околорудные метасоматиты изучались главным образом по случайным горизонтальным срезам. Позднее они стали изучаться в полном объеме тел метасоматитов (по серии разноуровневых горизонтальных сечений). Причина – потребность практической геологии в разработке методов прогнозирования оруденения на глубину на действующих предприятиях (золотая минерализация прослеживается на некоторых месторождениях до 1-1,2 км, в отдельных случаях до 3,7-4,0 км). Первые итоги изучения вертикальной метасоматической зональности на уральских золоторудных месторождениях были подведены в [Сазонов, 1980, 1984]. Главным из них было установление концентрически-зонального строения ореолов околорудно измененных пород (рис. 1). Аналогичное строение тел околорудно измененных пород установлено на Васильковском (рис. 3, 5) и ряде других месторождений (рис. 6). Более сложная зональность выявлена на месторождении Муртыкты. Здесь (рис. 2), а также на алтайских полиметаллических объектах (рис. 4) в верхней части ореолов березитизации-лиственитизации развиты существенно кальцитовые метасоматиты, зафиксировавшие Ca, вынесенный из внешней и промежуточной зон ореола березитизации-лиственитизации. Кроме того, во внутренней зоне последнего фиксируются шлировидные выделения, представленные хлоритовыми и хлорит-карбонатными метасоматитами. Подобные образования установлены на Лемвинском и Дальнем (Приполярный Урал) золото-полиметаллических месторождениях. В этих метасоматитах фиксировались Mg, Al, Fe, выносимые из пород при их березитизации-лиственитизации. Эти метасоматиты являются продуктами сопряженного (с березитами-лиственитами) осаждения. Они в пространстве и во времени тесно связаны с рудными телами. Судя по данным, приведенным в [Бахтина, Сазонов, 1980; Чекваидзе, 1982; Бахтина, 1985, и др.], а также на

Рис. 5. Зональность (в вертикальном поперечном разрезе) ореолов околорудно измененных пород на некоторых крупных золоторудных месторождениях Казахстана. По [Рафаилович, Алексеева, 1996].

1 – углеродисто-терригенная пачка; 2 – диориты и габбро; 3 – гранодиориты; 4 – контакты пород, указанных под знаками 2 и 3; 5 – надвиги; 6 – оперяющие дизъюнктивные структуры (разломы второго порядка); 7 – пропилиты: регионального (а) и локального (б) распространения; 8-10 – зоны метасоматитов: внутренняя (8), промежуточная (9), внешняя (10); 11 – калишпатиты высокотемпературные; 12-15 – метасоматиты месторождения Бакырчик: серицитовые (12), углеродисто-каолинит-гидрослюдистые (13), углеродисто-серицитовые (14), серицит-флогопит-карбонатные (15); 16 – зоны каолинитизации; 17 – кварц-адуляровая зона; 18 – хлорит-альбитовые метасоматиты; 19 – альбититы и альбитсодержащие породы; 20 – турмалинизация; 21 – золотоносный кварц (а – поздний средне- и низкотемпературный, б – ранний высокотемпературный); 22 – крупные рудные зоны; 23 – надрудные слабозолотоносные кварц-барит-доломитовые жилы и прожилки с киноварью, антимонитом, бертьеритом; 24 – реперные части метасоматических ореолов: А – фронтальная (надрудная), Б – прифронтальная (верхнерудная), В – промежуточная (среднерудная), Г – тыловая (нижнерудная и подрудная).

Рис. 6. Распределение типовых золоторудных месторождений Казахстана по уровням глубинности формирования. По [Рафаилович, Алексеева, 1996] с незначительными изменениями.

1-6 – формации осадочных, вулканогенных и метаморфических пород: 1 – вулканогенная и вулканогенно-терригенная, 2 – углеродисто-терригенная, 3 – карбонатно-терригенная, 4 – флишевая алевролит-песчаниковая, 5 – спилит-диабазовая, 6 – амфиболит-гнейсовая; 7-11 – магматиты: 7 – интрузии и экструзии гранитоидов, 8 – малые интрузии габбро-диорит-гранодиорит-граносиенитов, диорит-гранодиоритов, габбро-плагиогранитов, 9 – дайки диоритов, 10 – батолиты пестрого и умереннокислого составов, 11 – ультрабазиты и базиты; 12-19 – рудные формации: 12 – золотосульфидная, 13 – золотосульфидно-кварцевая, 14 – золотоалюмосиликатная, 15 – золотобарит-полиметаллическая, 16 – золотосеребро-кварц-адуляровая, 17 – золото-серебро-кварцевая, 18 – золотосеребро-полиметаллическая, 19 – золотокварц-сурьмяно-ртутная; 20 – рудные тела: жилы, линзы, зоны и залежи, 21 – кварцевые и кварц-сульфидные штокверки; 22 – скарны (преимущественно линзовидной фломы); 23 – приразломные метасоматиты; 24 – площадные изменения (вторичные кварциты, пропилиты). Метасоматические формации: А – аргиллизитовая, КА – кварц-адуляровая, КС – кварц-серицитовая, МК – кварцевая, КБ – кварц-баритовая, КТ – кварц-турмалиновая, Б – березитовая, Г – гумбеитовая, УС – углеродисто-серицитовая, С – скарновая, К – калишпатовая, Лп – лиственитовая поздняя, Лр – лиственитовая ранняя. I-VI – эталонные месторождения: I_1 – Каратал (слева), I_2 – Тохтаровское (справа); II_1 – Бакырчик (сверху), II_2 – Васильковское (снизу), II_3 – Саяк-4 (справа); III_1 – Акбакай (слева), III_2 – Кыргау (справа); IV – Уштаган; V_1 – Архарлы (вверху), V_2 – Торткудук (снизу), V_3 – Кудер (справа); VI_1 – Казкудук (слева), VI_2 –Наурызбай.

рис. 2, 4 и др., наличие на золото-полиметаллических и полиметаллических месторождениях метасоматитов стадии осаждения является для них типоморфным признаком. На некоторых полиметаллических месторождениях выявлена вертикальная зональность в локализации метасоматитов этой стадии [Чекваидзе, 1982]. Суть ее заключается в смене снизу вверх хлоритовых метасоматитов карбонат-хлоритовыми, а последних кварц-альбитовыми. Иногда на указанных объектах удается выделить еще синрудные (или сорудные) метасоматиты (рис. 2, 4-6). В то же время, на большинстве золоторудных месторождений кварц-жильной формации (в качестве примера возьмем Березовское рудное поле на Среднем Урале и Материнскую жилу в Калифорнии, США) сорудные метасоматиты обычно не выделяются, хотя признаки их развития устанавливаются (разжелезивание анкерита, появление хлорита около и внутри

Рис. 7. Разноуровневые элементы вертикальной метасоматической зональности на некоторых рудных месторождениях, сопровождающихся околорудными метасоматитами березит-лиственитовой, кварц-серицитовой формаций и сорудными.

Рис. 8. Геологический разрез через золоторудное поле Мурунтау по профилю сверхглубокой скважины СГ 10 (I) и схема распределения геохимических ассоциаций в вертикальном диапазоне 0-4 км (II). По [Рафаилович и др., 2003].

1, 2 – отложения пестрого бесапана: 1 – верхняя пачка, 2 – средняя и нижняя пачки (золотопродуктивный горизонт); 3 – серый бесапан; 4 – нижний бесапан; 5 – верхний тасказган; 6 – «слепое» тело лейкогранитов; 7, 8 – дайки: 7 – сиенит-диоритовые, 8 – аплитовидные гранитные; 9 – золоторудные залежи; 10 – скважина СГ 10; а-д – геохимические ассоциации: а – тыловая урановорудная (Mo, U, V), б – «сквозная» дорудная (Ni, Co, Mn, Cu) образовалась в стадию прогрессивного плутонометаморфизма), в – сквозная продуктивная золоторедкометальная додайковая, г – сквозная продуктивная (Au-As-Ni-C0-Zn) последайковая, д – фронтальная слабозолотоносная (Pb-Ag-Sb-Ba-Hg-/Au/).

рудных тел. Все это достаточно отчетливо проявлено на Быньговском золоторудном месторождении (Средний Урал). Выявление и изучение таких признаков невозможно без примнения современных «тонких» методов изучения минерального вещества.

В процессе изучения вертикальной метасоматической зональности были отмечены парадоксальные явления. В частности, на одном из месторождений, сопряженном с аргиллизитами, слоистые силикаты были изучены на глубину 1,3 км от дневной поверхности [Русинов и др., 1982]. При этом предполагалось, что с глубиной глинистые минералы сменятся серицитом или пирофиллитом. Однако аргиллизиты были прослежены до указанной глубины. Авторы цитированной работы полагают, что причина этого – быстрое заполнение трещинной структуры флюидом и кристаллизация глинистых минералов на различных уровнях из раствора с одинаковой температурой. Рассмотрим второй пример, взятый из этой же работы. На урановом месторождении была детально изучена минералогия березитов до глубины 1,2 км. Оказалось, что во всем этом интервале слюда представлена серицитом мусковитового типа (политип $2M_1$) с незначительной примесью серицита политипв 1М. Учитывая, что сорудные метасоматиты развиты на золото-полиметаллических и полиметаллических месторождениях, которые контролируются зонами дробления и рассланцевания, в совокупости все эти факты можно истолковать следующим образом. В трещинных структурах флюид продвигается быстро, и дифференции по Т не происходит. В зонах дробления флюид продвигается замедленно, и в этих случаях дифференциация по температуре проявляется четко.

Эволюция количественного минерального состава тел метасоматитов в вертикальной плоскости хорошо изучена на уральских золоторудных месторождениях кварц-жильного типа [Сазонов, 1984]. Суть ее заключается в том, что количество кварца во внутренней зоне тел метасоматитов нарастает снизу вверх, а суммарное содержание карбоната и слюды, на-

оборот, сверху вниз. Кроме того, снизу вверх увеличивается количество пирита, а магнетита – уменьшается. Очевидно, это является общей закономерностью для рассматриваемых образований, так как отмечено и на других объектах [Проблемы…, 1982]. По-видимому, здесь уместно отметить, что в ряде случаев (на Дарасунском и южноуральском Светлинском месторождениях) во внутренней зонке метасоматического ореола хлорит с глубиной сменился эпидотом [Щербань и др., 1982; Месторождения…, 2001].

Материал для оценки эволюции некоторых параметров (оптических, железистости и др.) минералов различных зон метасоматитов весьма ограничен. Приведем два наиболее показательных примера: 1. Для метасоматитов внутренней зоны ореолов околорудных изменений пород Березовского, Крылатовского и Быньговского месторождений (Средний Урал) установлено нарастание железистости карбоната и серицита с глубиной [Сазонов, 1998](аналогичное наблюдение над карбонатом сделано на Дарасунском месторождении [Щербань и др., 1982]); 2. Иногда в вертикальных сечениях таких ореолов отмечается дифференцированное распределение светлых слюд. Так, на Воронцовском месторождении (Северный Урал) в разрезе березитизированных-лиственитизированных пород (долеритов, андезитов) указанные слюды во внутренней зоне метасоматитов представлены серицитом ($2M_1$), последний выше по разрезу – апикальная часть внутренней зоны и промежуточная зона ореола измененных пород – сменяется парагонитом, и, наконец, еще выше – апикальная часть промежуточной зоны и внутренняя зона – на смену парагониту приходит его ассоциация с серицитом мусковитового типа.

Золоторудные месторождения могут формироваться на глубинах от первых сотен метров до 4,5 км и больше. Все они, на основе геологических материалов и данных, полученных методами гомогенизации газово-жидких включений в кварце и распределения железистости и магнезиальности между сокристаллизованными доломитом и кальцитом в метасоматитах, подразделены на три группы по глубине формирования от палеоповерхности: 1) малоглубинные (до 1,8 км), среднеглубинные (1,8-4,5 км) и глубинные (> 4,5 км). Указанные реперы глубинности нашли обоснование с физико-химических позиций в виде выделения открытых (объекты первого типа), полуоткрытых (объекты второго типа) и закрытых (объекты третьего типа) гидротермальных систем [Прокофьев, 2000]. Кстати, в сводке по золоторудным месторождениям-гигантам [Константинов и др., 2000], а также по золоторудным месторождениям Казахстана [Рафаилович, Алексеева, 1996], (рис. 6), использован практически такой же подход при выделении типов золоторудных месторождений по глубинности их образованиия Причем вертикальный ряд (от поверхности на глубину) околорудных изменений различных формаций: аргиллизиты–кварц-серицитовые метасоматиты–березиты-лиственитиы–эйситы–гумбеиты, установленный для Урала [Сазонов, 1998], в целом характерен и для других складчатых областей (рис. 6). Из данных, приведенных в [Сазонов, 1998] и рис. 6, следует, что формации околорудно измененных пород корреспондируются с глубинностью породивших их магматитов.

Заканчивая статью, подчеркнем, что в последние годы за рубежом и в РФ появились работы, которые позволяют количественно моделировать гидротермальные процессы, а также выяснять зависимость минеральных парагенезисов от РТХ-параметров в сложных, многокомпонетных системах [Bertman et al., 1987; Bertman, 1988; Борисов, 2000; Гричук, 2000]. Нет сомнений, что для дальнейших успехов в деле изучения вертикальной метасоматической зональности необходимы более глубокие исследования, базирующиеся на методиках, приведенных в перечисленных работах. Особое внимание при этом должно быть уделено созданию количественных моделей.

Выводы

1. Ореолы околорудно измененных пород – продукты кислотного выщелачивания имеют концентрически-зональное строение. Это, а также конвергентность некоторых метасоматитов (березитов, кварц-серицитовых, аргиллизитов) являются специфическими чертами таких ореолов.

2. Вертикальная зональность ореолов околорудных изменений создается их концентрически-зональным строением, которое подтверждается дифференцированным распределением в горизонтальной и вертикальной плоскостях метасоматитообразующих минералов (и оптических параметров последних), а также Au и сопутствующих ему элементов-спутников.

3. Главные черты вертикальной зональности ореолов околорудно измененных пород

вполне удовлетворительно объясняются с позиций различного распределения T по вертикали в трещинных структурах и зонах дробления и рассланцевания (в первом случае T примерно константная величина, а во втором – сильно диффенренцированная по вертикали, для первого случая сорудные метасоматиты не характерны, для вторго случая они типоморфны).

4. Главные черты вертикальной метасоматической зональности ореолов околорудно измененных пород достаточно убедительно объясняются с позиций кислотно-основной дифференциации гидротерм [Проблемы…, 1982]. В [Сазонов, 1998] показано, что основная причина ее возникновения – вполне определенное изменение pH раствора в вертикальном сечении гидротермальной системы: у нижней выклинки внутренней зоны метасоматитов этот параметр за счет снижения T (повышение этого параметра с глубиной отмечено для всех изученных месторождений) достигает величины, оптимальной для протекания процесса березитизации-лиственитизации, у верхней выклинки этой зоны pH при продолжающемся снижении T увеличивается (причина – вынос при метасоматозе из исходных пород Na, Ca, Mg, Fe и др. элементов), минеральный парагенезис: кварц + карбонат + серицит становится неустойчивым, к нему сначала добавляется альбит, затем хлорит. С этих же позиций хорошо объясняется преимущественное развитие метасоматитов осаждения в апикальной части рассматриваемых ореолов, а также относительное обогащение апикальной части внутренней зоны кварцем, а корневой – карбонатом.

5. Выделены и охарактеризованы субстанции вертикальной метасоматической зональности на золоторудных и золотополиметаллических месторождениях Урала. В комплексе они дают возможность оценить степень эродированности месторождений и, следовательно, степень перспективности на глубину. Их также можно использовать при поисках слепого оруденения.

6. В последние годы сильно выросли уровни количественного анализа парагенезисов в гидротермальных процессах и моделирования последних. Полагаем, что приложение их к изучению вертикальной метасоматической зональности поднимет наши знания о ней на новую, более высокую ступень.

Исследования проводились при частичной финансовой поддержке грантов Минобрнауки РНП.21.1.1840 и НШ-4210.2006.5

Список литературы

Бахтина А.П. Состав и закономерности формирования метасоматитов золотополиметаллического месторождения: Канд. дис. Свердловск: ИГГ УНЦ АН СССР, 1985. 298 с.

Бахтина А.П., Сазонов В.Н. Околорудный метасоматоз на одном золоторудном месторождении // Околорудные метасоматиты Урала. Свердловск: УНЦ АН СССР, 1980. С. 52-67.

Борисов М.В. Геохимические и термодинамические модели жильного гидротермального рудообразования. М.: Научный мир, 2000. 360 с.

Гричук Д.В. Термодинамические модели субмаринных гидротермальных систем. М.: Научный мир, 2000. 304 с.

Константинов М.М., Некрасов Б.М., Сидоров А.А. и др. Золоторудные гиганты России и мира. М.: Научный мир, 2000. 272 с.

Коротеев В.А., Сазонов В.Н. Геодинамика, рудогенез, прогноз. Екатеринбург: ИГГ УрО РАН, 2005. 181 с.

Крупные и суперкрупные месторождения (закономерности размещения и условия образования) / Под ред Д.В. Рундквиста. М.: ИГЕМ РАН, 2004. 430 с.

Месторождения золота Урала / В.Н. Сазонов, В.Н. Огородников, В.А. Коротеев, Ю.А. Поленов Екатеринбург: ИГГ УрО РАН, УГГГА, 2001. 622 с.

Миляев С.А., Чекваидзе В.Б., Исаакович И.З. Количественная модель минералого-геохимических ореолов Васильковского золоторудного месторождения // Отечественная геология. 1994. № 7. С. 36-42.

Проблемы вертикальной метасоматической зональности / Под ред. Н.Н. Перцева. М.: Наука, 1982. 184 с.

Прокофьев В.Ю. Геохимические особенности рудообразующих флюидов гидротермальных месторождений золота различных генетических типов. Новосибирск: Наука, 2000. 192 с.

Рафаилович М.С., Алексеева М.К. Метасоматические формации золотопродуктивных месторождений Казахстана // Геология и разведка недр Казахстана. 1996. № 5-6. С. 13-21.

Рафаилович М.С., Голованов И.М., Федоренко О.А. и др. Геолого-геохимические особенности и геохимическая зональность золотого оруденения в черных сланцах (на примере гигантских месторождений Уральско-Монгольского складчатого пояса) // Уральский геологический журнал. 2003. № 1. С. 81-97.

Рундквист Д.В., Павлова И.Г. Опыт выделения формаций гидротермально-метасоматических пород // Записки ВМО. 1974. Вып. 3. С. 289-304.

Русинов В.Л., Омельяненко Б.И., Зотов А.В. и др. Некоторые аспекты проблемы вертикальной метасоматической зональности // Проблемы вертикальной метасоматической зональности. М.: Наука, 1982. С. 5-14.

Сазонов В.Н. Березит-лиственитовая формация Урала и сопутствующее ей оруденение. Докт. дисс. Свердловск: ИГГ УНЦ АН СССР. 1980. 530 с.

Сазонов В.Н. Березит-лиственитовая формация и сопутствующее ей оруденение. Свердловск: УрО АН СССР, 1984. 208 с.

Сазонов В.Н. Золотопродуктивные метасоматические формации подвижных поясов. Екатеринбург: ИГГ УрО РАН, УГГГА, 1998. 181 с.

Сазонов В.Н. Итоги исследований золотпродуктивных метасоматических формаций Урала и состояния проблемы вертикальной зональности ореолов околорудных изменений на золоторудных месторождениях региона // Уральский геологический журнал. 2000. № 6. С. 99-109.

Чекваидзе В.Б. Вертикальная метасоматическая зональность колчеданно-полиметаллических месторождений // Проблемы вертикальной метасоматической зональности. М.: Наука, 1982. С. 89-104.

Щербань И.П., Дроздовская А.А., Широких И.Н. Некоторые черты вертикальной зональности березитов (на примере Дарасунского месторождения) // Проблемы вертикальной метасоматической зональности. М.: Наука, 1982. С. 147-159.

Bertman R.G. Internal consistent thermodynamic data for minerals in the systems: Na_2O-K_2O-CaO-MgO-FeO-Fe_2O_3-Al_2O_3-SiO_2-TiO_2-H_2O-CO_2 // J. Petrol. 1988. V. 29. P. 445-522.

Bertman R.G., Brown T.H., Perkins E.H. Geocalc: software for calculation and display of P-T-X phase diagrams // Amer. Mineral. 1987. V. 72. P. 861-862.

Рецензенты доктор геол.-мин. наук В.Л. Русинов,
доктор геол.-мин. наук И.В. Викентьев