

*Пленарные доклады, представленные
на Юбилейную сессию Российской Академии Естествознания
(Москва, 15–18 ноября 2010 г.)*

Геолого-минералогические науки

**ПЕТРОЛОГИЧЕСКИЕ ЧЕРТЫ
МЕТАЛЛОГЕНИИ ЗОЛОТА**

Кучеренко И.В.

*Национальный исследовательский
Томский политехнический университет,
Томск, Россия
e-mail:kucherenko.o@sibmail.com*

Как показала столетняя история исследований, созданные природой сотни миллионов... миллиарды лет назад месторождения многих полезных ископаемых неохотно расстаются с тайнами своего происхождения. Между тем, стремление человечества раскрывать эти тайны продиктовано не только и не столько естественным любопытством, сколько потребностью познания сущности процессов рудообразования как способа получать надежные средства для прогнозирования и поисков новых месторождений, дефицит которых нарастает по мере исчерпания запасов руд в известных освоенных объектах.

Одна из ключевых нерешенных проблем теории гидротермального рудообразования в приложении к созданным горячими водными растворами, то есть эндогенным, месторождениям золота, – проблема источников энергии, флюидов и сосредоточенного в рудах металла, в сочетании с растворопроводящими путями – разломами земной коры и исчезающе малыми объемами последней, в которых «варятся» месторождения, образующих системы рудообразования. Наибольшие успехи достигнуты в реконструкции термодинамических, физико-химических режимов и других параметров взаимодействия металлоносных растворов с горными породами. Вопросы остаются актуальными, когда речь идет о том, какие геологические события инициируют и обуславливают рудообразование, – следствие более масштабных геологических процессов, – геодинамических, магматических и других, происходящих в недрах планеты. Именно они оставляют следы, выраженные в условиях локализации образующихся месторождений, в пространственно-временных и причинно-следственных соотношениях последних с другими производными упомянутых про-

цессов, в составе руд и окологорудно измененных вмещающих пород и пр., – те следы, которые наиболее информативны при использовании в прогнозно-поисковой практике. Однако природа была бы чрезвычайно простой и чрезмерно любезной, если бы позволила без надлежащих усилий однозначно интерпретировать многие из этих следов.

Гидротермальные руды золота всегда эпигенетичны по отношению к вмещающим их породам, то есть образованы после них. Прямых признаков происхождения перемещенного при рудообразовании в руды золота не найдено. Поэтому в исследовании обозначенной проблемы в части источников металла используются косвенные данные. В течение всего XX столетия вплоть до настоящего времени конкурируют с переменным успехом гранито-генная [1], базальтогенная [2], метаморфогенная [3] гипотезы; в последние годы к ним добавлена полигенная гипотеза «ступенчатого» накопления золота [4]. Первых две магмато-гидротермальных гипотезы предполагают в качестве источников энергии, растворов и металла магматические соответственно коровые гранитные или мантийные базальтовые расплавы и, таким образом, инициирование рудообразования функционированием соответствующих магматических очагов в коре или мантии. Согласно метаморфогенно-гидротермальной гипотезе, месторождения образуются в обогащенных на этапе осадконакопления золотом и органическим веществом породах – черных сланцах посредством концентрирования рассеянного в них золота под воздействием на породы высокотемпературных (до 600...700 °C) высокобарических (до 2,5 кбар) растворов разного происхождения – генерированных в магматических очагах или в блоках земной коры, подвергшихся метаморфизму с дегидратацией горных пород и минералов. Разработчики полигенной гипотезы полагают, что концентрирование рассеянного в породах золота и образование месторождений происходит поэтапно в результате функционирования нескольких независимых один от другого геологических процессов, разделенных временными интервалами до нескольких сотен млн лет. Длительное время предпринимаются

попытки противопоставления месторождений, образованных по одному из двух магматогенных сценариев в так называемом кристаллическом – магматическом, ультраметаморфическом субстрате, с одной стороны, и по метаморфогенному, полигенному сценариям в толщах черных сланцев осадочных бассейнов, с другой [5].

Перечисленные гипотезы вместе с их вариантами охватывают все мыслимые пути решения проблемы. Поскольку они предлагаются для одних и тех же месторождений, уникальных по запасам золота, факт их существования нельзя объяснить явлениями конвергенции – образованием одинаковых по составу руд и другим признакам объектов в разных геологических условиях. Сосуществование взаимно исключаящих одна другую гипотез есть показатель неблагоприятия в их доказательной базе, составленной и из косвенных данных.

В приложении к гидротермальным золотым месторождениям, образованным в кристаллическом субстрате и в толщах черных сланцев найдены факты, которые не вписываются в доказательную базу трех гипотез, но гармонично сочетаются в системе доказательств базальтогенной гипотезы, предполагающей генетическую связь рудообразования с поздним умеренно щелочным базальтоидным магматизмом, завершающим становление антидромных гранит-диорит-долеритовых флюидно-магматических комплексов [6].

В докладе приведены и обсуждаются упомянутые факты, с большей или меньшей полнотой выявленные в золотых месторождениях «несланцевого» типа в кристаллическом субстрате, – раннепалеозойских Центральном и Бериккульском (Кузнецкий Алатау), поздне-палеозойских Когадыр (Южный Казахстан), Ирокиндинском, Западном, Богодиканском, Верхне-Сауканском, отчасти Кедровском, Каралонском (Северное Забайкалье), и в месторождениях «сланцевого» типа, образованных в толщах черных сланцев, – позднерифейском Советском (Енисейский край), среднепалеозойском Холбинском (Восточный Саян), позднепалеозойских Кедровском, Каралонском (Северное Забайкалье), Сухоложском (Ленский район), Чертово Корято (север Патомского нагорья).

Опубликованы доказательства того, что месторождения обеих совокупностей несут в себе черты глубокого геолого-генетического родства [6]. Месторождения контролируются глубинными разломами и оперяющими их структурами, руды сложены сходными минеральными комплексами, последовательно сменяющимися один другой во времени и образованными в близких физико-химических и термо-

динамических условиях функционировавших в пульсационном режиме процессов. Кварцевожильные руды в кристаллическом субстрате и жильно-прожилково-вкрапленные кварцевосульфидные руды в толщах черных сланцев сопровождают околорудные в первом случае и рудообразующие во втором метасоматические и геохимические ореолы, в определяющих чертах сходные соответственно по минералогопетрохимической и геохимической зональности. Метасоматические ореолы представляют обычное сочетание березитовой в тыловых зонах и пропилитовой в периферийных зонах формаций. Изотопные отношения углерода жильных и метасоматических карбонатов и серы сульфидов, как правило, близки к метеоритному стандарту, а нередкие отклонения от этого стандарта изотопного состава сульфидной серы в месторождениях «сланцевого» типа объясняется унаследованием части серы вмещающих руды черных сланцев, поскольку последними сложена основная масса руды. Геохимические ореолы, занимая меньшие объемы, вписываются в метасоматические, а распределение рудогенных элементов в них подчиняется минералогопетрохимической зональности. Во всех породах от кларковых (субкларковых) значений вне и на дальней периферии метасоматических ореолов в направлении к тыловым зонам и рудным телам содержания, дисперсия распределения золота, серебра, мышьяка, ртути и других металлов, Au–Ag – отношение, коэффициенты корреляции золота с серебром и другими сопровождающими металлами возрастают, достигая максимумов в тыловой березитовой зоне, сопоставимых с перечисленными статистическими параметрами, свойственными рудам. Содержания золота в околорудных березитах соотносятся с таковыми в рудах: в обрамлении богатых рудных столбов они более высокие (до граммов в тонне породы) сравнительно с березитами, смежными с бедными рудами, в которых содержания золота не превышают десятков мг/т.

Найдено простое объяснение того, почему в месторождениях обеих совокупностей обычны противоположные зависимости между объемами руд и содержаниями в них золота: в апосланцевых крупнообъемных, нередко крупных и уникальных по запасам месторождениях средние содержания золота в рудах не превышают первых г/т при отсутствии рудных столбов, в отличие от малообъемных, преимущественно жильных месторождений, образованных в кристаллическом субстрате, среди которых даже крупные по запасам объекты редки, рудные

столбы богатых руд – обычное явление, а средние содержания металла варьируют от многих г/т до десятков и сотен г/т. Геологи, разделяющие идеи метаморфогенной и полигенной концепций, предполагающих местные (породные) источники сосредоточенного в рудах золота, видят в этом факте, в частности, одно из оснований для противопоставления месторождений той и другой совокупностей.

Причина различий заключается в проницаемости среды, в которую проникают напорные металлоносные растворы. В высокопроницаемых интенсивно трещиноватых сланцевых толщах поступающие в них по стволowym раствороподводящим разломам кристаллического фундамента в пульсирующем режиме потоки растворов разделяются на множество струй и пропитывают значительные объемы сланцев. Доказательством этому служит структура рудовмещающего метасоматического ореола типа «слоеного пирога», которая характеризуется многократным чередованием тыловых зон березитов (березитоидов) и периферийных зон более слабых пропилюподобных изменений сланцев. Возможности для пространственного совмещения в локальных объемах минеральных комплексов – производных последовательных порций растворов, в том числе продуктивных, которое обеспечивает наращивание концентраций золота и других металлов, ограничены. В противоположность этому в кристаллическом, как правило, массивном, а, следовательно, мало проницаемом субстрате путями движения и консервации металлоносных растворов служат рассредоточенные разломы-трещины, оперяющие стволые раствороподводящие, а через раствороподводящую функцию и рудоконтролирующие разломы. Они способны вместить несопоставимо меньшие объемы металлоносных растворов, последовательные порции которых повторяют одни и те же подновляемые при тектонических деформациях рудного этапа пути – рудовмещающие разломы. Благодаря этому достигается более эффективное по сравнению со сланцевыми толщами концентрирование металлов в локальных объемах жил, в том числе обеспечивается образование рудных столбов. Однако в последнем случае имеющееся пустотное пространство не способно вместить в полном объеме поступающие металлоносные растворы и последние, вероятно, находят пути для дальнейшего перемещения вверх, скажем, по тем же раствороподводящим глубинным разломам, достигающим дневной поверхности. Очевидно, при реализации этого варианта развития событий значительные массы металлоносных растворов рассе-

иваются и не «работают» на образование месторождений.

Перечисленные факты естественно оценивать не иначе как признаки образования месторождений в результате одних и тех же рудообразующих процессов, повторяющихся во времени и пространстве.

Для суждения о геологическом процессе, инициирующем и обеспечивающим рудообразование, дополнительно привлекаются два факта. Один из них раскрывает пространственно-временные соотношения руд и магматических пород и представляет магматический критерий связей рудообразования с магматизмом, второй характеризует некоторые важные для понимания сущности метасоматического и в целом гидротермального процесса петро-химические черты березитов и обозначен как петрохимический критерий упомянутых связей. Оба факта взаимно дополняют друг друга.

Магматический критерий. Гидротермальные золотые месторождения совмещены с ареалами образования плутонических горных пород, условия залегания и последовательность становления которых, реконструированная по структурным соотношениям и признакам термического воздействия поздних производных на ранние, единообразно повторяются в ряде объектов в возрастном диапазоне до 35...70 млн лет.

В наиболее полном объеме выделяемые магматические комплексы включают ранние плутоны (массивы) гранитоидных пород или зрелые очагово-купольные постройки с гранитами, гранодиоритами до кварцевых диоритов в ядерных частях (Кедровский купол). В плутонах, куполах и их обрамлении обычны выполняющие разломы дайки аплитов, фельзитовых микрогранит-порфиров, гранитных пегматитов. В других случаях кислые породы представлены протяженными поясами даек микрогранитов, гранит-порфиров, как, например, в центральной части Бодайбинского прогиба, где сосредоточены золоторудные месторождения, в том числе Сухоложское. В числе изученных месторождений есть объекты, в которых кислые изверженные породы, к которым близки по возрасту руды, залегают в форме редких даек среди древних гранитоидов (Верхне-Сакуканское месторождение), или архейских ультраметаморфитов (Ирокиндинское месторождение).

$^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ -отношения в минералах ранних кислых пород комплексов отвечают мантийным меткам и подчеркивают их образование посредством плавления корового субстрата под воздействием мантийных флюидов-теплоносителей.

Кислые породы сменяются средними – диоритоидами, залегающими, в частности, среди ранних гранитоидов в форме даек или, в сланцевых толщах, даек и силлов. Среди диоритоидов диагностированы микродиориты, диоритовые порфириды, дайки которых пересекают дайки кислых пород, но гидротермально изменены около руд. В объеме обсуждаемых магматических комплексов диоритоиды представляют промежуточное связующее звено в схеме эволюции магматизма от кислого к основному.

На следующем и завершающем становление комплексов этапе флюидно-магматической активности образованы базитовые (базальтовые) дайки не менее пяти генераций и рудные тела. Насколько можно судить по ситуации в Бериккульском месторождении, среди базитовых даек – умеренно щелочных долеритов не менее двух генераций образованы до начала рудообразования – пересекая гранитоиды и диоритоиды, в том числе залегая в плутонах, долериты в контактах с рудными телами преобразованы в березиты. Нередко золоторудные кварцевые жилы следуют этим дайкам, пересекая их при переходе из одного бока в другой. Диагностированы внутрирудные дайки умеренно щелочных долеритов, – они пересекают ранние минеральные комплексы руд, но пересечены поздними и гидротермально изменены в контакте с ними. Поздние дайки не менее двух генераций, как и дорудные, пересекают одна другую и поздние минеральные комплексы руд, но почти не содержат эпигенетических минеральных ассоциаций.

В тех месторождениях, в которых золоторудные жилы частично или полностью залегают среди предшествовавших им гранитоидов (Когадыр, Центральном, Кедровском, Каралонском), как, впрочем, и в других породах, дорудные дайки умеренно щелочных долеритов в участках слабого изменения на некотором удалении от руд демонстрируют стабильность минералого-химического состава при отсутствии послегранитных дорудных гибридных даек. Это исключает смешение базальтовых расплавов с кислыми магмами, которые, следовательно, к моменту инъекций ранних базальтовых расплавов, а затем и ранних порций металлоносных растворов уже не существовали. Существовали массивы гранитоидных пород, которые в результате предрудных тектонических деформаций рассекались разломами – каналами поступления расплавов и растворов из глубинных магматических очагов. Приведенный факт подчеркивает чрезвычайно малую вероятность генерации металлоносных растворов в уже раскристаллизованных кислых магмах.

Особый интерес для реконструкции флюидно-магматического процесса представляют внутрирудные дайки умеренно щелочных долеритов, детально изученные в Бериккульском, Холбинском, Кедровском, Сухоложском месторождениях, в месторождении Чертово Корято. Залегая среди свежих или слабо измененных пород – гранитов, мигматитов, гнейсов, углеродистых терригенных сланцев, они преобразованы в полнопроявленные метасоматиты, в том числе на удалении от рудных тел. В составе обычных для пропилитов минеральных ассоциаций (эпидота, хлоритов, альбита и др.) участвуют высокотемпературные минералы – роговая обманка и биотит, которые отсутствуют в околорудных метасоматических ореолах мезотермальных золотых месторождений березит-пропилитового профиля. Амфиболизация долеритов обычно слабая, но содержание новообразованного биотита достигает 40...50 об. %. В аподолеритовых метасоматитах рудного этапа в Холбинском месторождении венчики пластинок наиболее позднего свежего биотита обрамляют кристаллы бывшего пироксена, полностью замещенного тонкозернистым агрегатом серицита, альбита, кварца, хлорита, эпидота, карбонатов. Эти факты доказывают флюидопроводящую в горячем состоянии функцию даек и более высокотемпературный по сравнению с березитизацией-пропилитизацией режим внутридайкового метасоматизма, а фиксируемое обогащение аподайковых метасоматитов золотом и другими металлами – присутствие в растворах их соединений. Очевидно, высокотемпературный режим внутридайкового метасоматизма обеспечивался дополнительным разогреванием растворов в еще горячих дайках. Из этих фактов также следует вывод, согласно которому поступление металлоносных растворов в область рудообразования происходит вслед за инъекций базитовых расплавов с интервалом времени, в течение которого образующиеся внутрирудные дайки не успевают остыть.

Петрохимический критерий. Открытие контрастных аномалий группы фемофильных элементов (P, Ti, Mg) в околожильных березитах Ирокиндинского месторождения в ближнем (до 1,5 км) обрамлении Келянской зоны глубинных разломов [7] актуализировало целесообразность оценки масштабов распространения этого явления и условий его возникновения. Исчезновение в золотоносных березитах аномалий фемофильных элементов по мере удаления от глубинного разлома в сочетании со снижением содержания титана в метасоматическом пирите, запасов золота в жилах, от-

сутствием признаков выноса их из вмещающих (окружающих) руды и околорудные метасоматические ореолы пород квалифицирует Келянскую зону глубинных разломов как раствороподводящий канал, по которому золото, сопутствующие ему, в том числе обсуждаемые элементы поступали в область рудообразования. В дальнейшем к перечню фемофильных элементов добавлены Fe, Mn, Ca, а контрастные приразломные аномалии всей этой ассоциации с коэффициентами концентрации до 10...11 выявлены в околорудных золотоносных березитах и биотитовых метасоматитах, образованных во внутрирудных дайках-флюидопроводниках умеренно щелочных долеритов, в Кедровском месторождении, в апосланцевых золотоносных березитах месторождений Каралонского и Чертово Корято. Рутил в повышенных количествах присутствует в околорудном пространстве Советского, Сухоложского месторождений, кристаллы голубого и розового апатита – в золотоносных жилах последнего, повышенные концентрации титана отмечены в золотых рудах и метасоматитах месторождений Колар, Мангалуру в Индии, Обуаси в Гане, Кэтлин, Коннемара в Западной Австралии и ряда других.

Известно, что титан, фосфор, магний, железо характеризуют петрохимические черты ультраосновных, основных и продуктов их дифференциации щелочных магм, – производных мантийного магматизма, более того, накапливаются в них в промышленных масштабах (Волковское, Качканарское, Хибинское месторождения).

Маловероятно получить удовлетворительное объяснение всем приведенным фактам в их сочетании с позиций конкурирующих полигенной, метаморфогенной, гранитогенной концепций.

В согласии с приведенными фактами высокая вероятность генерации металлоносных растворов в очагах умеренно щелочных базальтовых расплавов и образование золотых месторождений в кристаллическом и сланцевом субстрате на завершающих этапах функционирования повторяющихся во времени и пространстве антидромных гранит-диорит-долеритовых флюидно-магматических комплексов. В этом случае рудно-магматические системы включают мантийные магматические очаги, вскрывающие их глубинные разломы – каналы пульсирующего чередующегося поступления ранних высокотемпературных «безрудных» флюидов-теплоносителей и поздних умеренно щелочных базальтовых расплавов и металлоносных растворов в верхнекоровые блоки их консервации

в опережающих раствороподводящие глубинные разломы структурах.

Флюидно-магматическая и сопровождающая ее геодинамическая активность мантии планеты может быть инициирована воздействием на ее субстрат восходящих из глубинных геосфер, возможно, из жидкого ядра Земли, высокотемпературных (до 6000 °С) газовых восстановленных водородных, водород-углеводородных флюидов, формировавших мантийные плюмы – крупнообъемные очаги аномальной мантии, ответственные за создание мощных потоков расплавов и металлоносных надкритических растворов. На фронтах встречи последних с холодными метеорными водами глубоких (до 4...7 км) уровней циркуляции вследствие нарушения химического равновесия в системах происходит рудообразование.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Гамянин Г.Н., Горячев Н.А., Бахарев А.Г. и др. Условия зарождения и эволюции гранитоидных золоторудно-магматических систем в мезозоидах Северо-Востока Азии. – Магадан: СВ КНИИ ДВО РАН, 2003. – 196 с.

2. Русинов В.Л., Русинова О.В., Борисовский С.Е. и др. Состав метасоматических минералов золоторудного месторождения Сухой Лог как критерий его генетической связи с базит-гипербазитовым магматизмом // Доклады РАН. – 2006. – Т. 405. – № 5. – С. 661–665.

3. Large Ross R., Maslennikov Valery V., Francois Robert, Danyushevsky Leonid V., Chang Zhaoshan. Multistage sedimentary and metamorphic origin of pyrite and gold in the giant Sukhoi Log deposit, Lena gold province, Russia // Economic Geology. – 2007. – V. 102. – № 7. – P. 1233–1267.

4. Кузьмин М.И., Ярмолюк В.В., Спиридонов А.И. и др. Геодинамические условия формирования золоторудных месторождений Бодайбинского неопротерозойского прогиба // Доклады РАН. – 2006. – Т. 407. – № 6. – С. 793–797.

5. Критерии отличия метаморфогенных и магматогенных гидротермальных месторождений / Под ред. В.И. Смирнова и Н.Л. Добрецова. – Новосибирск: Наука, 1985. – 176 с.

6. Кучеренко И.В. Концепция мезотермального рудообразования в золоторудных районах складчатых сооружений южной Сибири // Известия Томского политехнического университета. – 2001. – Т. 304. – № 1. – С. 182–197.

7. Кучеренко И.В. О фосфор-магний-титановой специализации золотоносных березитов // Доклады АН СССР. – 1987. – Т. 293. – № 2. – С. 443–447.