

УДК 553.411.071.242.4+550.4

ПЕТРОЛОГО-ГЕОХИМИЧЕСКИЕ ЧЕРТЫ РУДОВМЕЩАЮЩЕГО СУБСТРАТА В ГИДРОТЕРМАЛЬНЫХ МЕСТОРОЖДЕНИЯХ ЗОЛОТА. ЧАСТЬ 1. ПЕТРОЛОГИЯ ОКОЛУРУДНОГО МЕТАСОМАТИЗМА

Кучеренко Игорь Васильевич,

kivr@tpu.ru

Национальный исследовательский Томский политехнический университет,
Россия, 634050, г. Томск, пр. Ленина, 30.

Актуальность исследования заключается в необходимости корректировки и углубления геологической (металлогенической) составляющей теории образования гидротермальных месторождений золота, в рамках которой противоречивые представления о геологической обусловленности рудообразования (источниках энергии и металлоносных флюидов) укладываются в четыре конкурирующих, исключая одна другую, гипотезы, вследствие чего невозможно разработать комплекс эффективных прогнозно-поисковых критериев оруденения.

Цель исследования: посредством использования альтернативной существующим методологии и следующих из нее методов петролого-геохимических исследований рудовмещающего, в том числе черносланцевого, субстрата получить данные (достоверные факты), способные обеспечить: 1) доказательство принадлежности эпигенетических минеральных ассоциаций этапа рудообразования в толщах околорудно-измененных углеродистых (черных) сланцев, вопреки популярным представлениям, к метасоматическим формациям и, как следствие, вещественно-генетической однородности апочерносланцевых зональных метасоматических колонок (ореолов) с образованными в несланцевом (кристаллическом) субстрате; 2) на гипсометрических уровнях залегания оруденения доказательство внешних (внепородных) источников золота и сопровождающих металлов, сосредоточенных в рудах месторождений, образованных в толщах черных сланцев.

Методы исследования: 1) на полевом этапе изучения рудовмещающего субстрата и руд – составление геологических разрезов, ориентированных вкрест простирания околорудных метасоматических ореолов (колонок) и, как правило, выходящих за пределы или на дальнюю их периферию, с отбором проб многоцелевого назначения массой 1,5...2,0 кг; 2) подготовка (измельчение, стирание) проб без сокращения для анализов в лицензированных лабораториях с соблюдением приемов, обеспечивающих их чистоту; 3) диагностика химических составов минеральных видов и разновидностей в электронных микроскопах с рентгеноспектральным сопровождением; 4) полный химический (мокрый) силикатный анализ проб горных пород; 5) атомно-абсорбционный (чувствительность $1 \cdot 10^{-8}$ мас. % для золота, серебра, $5 \cdot 10^{-7}$ мас. % для ртути), контрольные нейтронно-активационный и химико-спектральный анализы на золото (чувствительность $1 \cdot 10^{-8}$ и $3 \cdot 10^{-8}$ мас. % соответственно); 6) петрохимические пересчеты результатов полных химических силикатных анализов горных пород по объемно-атомному методу; 7) балансовые расчеты межзональной миграции петрогенных химических элементов в околорудных метасоматических колонках; 8) расчеты статистических параметров распределения и баланса металлов в околорудном, междурудном пространстве месторождений с использованием двухуровневой системы выборок, обеспечивающие реконструкцию геологической истории химических элементов и, на этой основе, корректную оценку донорского потенциала горных пород, включая черные сланцы.

Результаты исследования. В результате исследований, выполненных в шестнадцати золоторудных месторождениях обеих совокупностей южного горно-складчатого обрамления Сибирского кратона, реконструирована двух-, трехэтапная история формирования несланцевого и черносланцевого рудовмещающего субстрата, разработана единая (типовая) петролого-геохимическая модель околорудных зональных метасоматических ореолов (колонок), представляющих сочетание березитовой во внутренних и пропилитовой в промежуточной хлоритовой и фронтальной зонах формаций. Полиминеральный состав тыловой (березитовой) зоны, отличный от двухкомпонентного (кварц, серицит) состава теоретической модели Д.С. Коржинского, формируется в системе порода–раствор, открытой в сторону выноса (Na, Si) и привноса компонентов, поступающих с металлоносными растворами извне и фиксируемых в собственных минеральных новообразованиях и в качестве примесей преимущественно во внутренних зонах. Согласно балансовым расчетам, в ореолы и руды поступает калий (серицит), восстановленная сера (сульфиды), окисленный (карбонаты) и восстановленный (кероген, углеводороды) углерод, рудогенные (Au, Ag, As, Hg и др.), в обрамлении рудоконтролирующих через раствороподводящую функцию глубинных разломов – петрогенные фемофильные (Ti, P, Mg, Fe, Ca, Mn) элементы. Контрастность аномалий достигает многих сотен и тысяч %. Ti и P образуют собственные минеральные фазы – рутил, лейкоксен, апатит, Mg, Fe, Ca, Mn входят в состав карбонатов, другие металлы фиксируются в собственных минералах и примесях. Распределение золота и сопровождающих металлов в околорудном пространстве подчиняется метасоматической зональности – околорудные геохимические ореолы всегда занимают меньшие объемы сравнительно с околорудными метасоматическими. Это выражается в субкларковых содержаниях (золота 0,5...1,2 мг/т) и низкой дисперсии распределения золота, серебра, ртути в разных породах, включая регионально-метаморфизованные на уровне мусковит-биотитового парагенезиса черные сланцы вне и в подзоне слабого изменения фронтальной зоны околорудных метасоматических ореолов, и в последовательном увеличении этих параметров, а также золото-серебряного отношения и силы корреляционных связей золота с серебром от одной минералого-петрохимической зоны к другой по мере усиления околорудных метасоматических преобразований пород с достижением максимальных значений в тыловой зоне, тем больших, чем выше содержания металлов в рудах. Полученные результаты доказывают вещественно-генетическую однородность производных рудообразующих процессов в несланцевом и черносланцевом субстрате и синрудное происхождение контрастных геохимических аномалий металлов (сверхкларковых их содержаний) в околорудном пространстве мезотермальных золоторудных месторождений. В первой части статьи приведены результаты изучения околорудных метасоматических ореолов (колонок), во второй – результаты изучения распределения рудогенных (Au, Ag, Hg) элементов в околорудном пространстве, обсуждаются петролого-геохимические материалы и формулируются выводы.

Ключевые слова:

Гидротермальные месторождения золота, кристаллический (несланцевый) субстрат, черные сланцы, околорудные (рудовмещающие) зональные метасоматические, геохимические ореолы.

Постановка задачи

Один из итогов столетних исследований проблемы образования гидротермальных месторождений золота заключается в разработке четырех с вариантами гипотез, каждая из которых исключает остальные: гранитогенной, обсуждаемой в работах R. Mustard et al. [1], А.И. Гусева [2], Martinez-Abad et al. [3], Tran Tuan Anh et al. [4]; базальтогенной, доказываемой в работах В.Л. Русинова и др. [5], П.В. Комарова и др. [6], S. Sarangi [7], I.V. Kucherenko et al. [8, 9]; метаморфогенной, рассмотренной в трудах В.А. Бураяка и др. [10], J.S. Goldberg et al. [11], J. Shao et al. [12], R. Large et al. [13], S. Meffre et al. [14], С.Г. Кряжева и др. [15], И.В. Чернышова и др. [16], М.А. Юдовской и др. [17], А.И. Khanchuk et al. [18], Wang Jianping et al. [19], J.A. Steadman et al. [20]; полигенной, приведенной в публикациях М.И. Кузьмина и др. [21], Н.П. Лаверова и др. [22] и других. Сосуществование гипотез может быть мирным, если каждая из них описывает условия образования разных месторождений и, возможно, отражает конвергенцию рудообразования, и/или конкурентным, если все они или в разных сочетаниях предложены, что нередко, для объяснения условий образования одного месторождения.

Состояние неопределенности в оценке каждой гипотезы, обусловленное дефицитом достоверных эмпирических данных, трудностями, связанными с их интерпретацией и реконструкцией процессов рудообразования по оставленным ими вещественным следам, оказывает негативное влияние на совершенствование теории и прогнозно-поисковых критериев оруденения, значение которых возрастает по мере неизбежной смены приоритетов на прогнозирование и поиски месторождений, залегающих на экономически приемлемых глубинах, но не вскрытых эрозией.

К числу ключевых из ряда дискуссионных вопросов, в частности, относятся:

- принадлежность апосланцевых ореолов околорудно-измененных пород к метасоматическим формациям или субфациям регионального «регрессивного» метаморфизма (гидратации);
- происхождение повышенной, высокой золотосодержимости черных сланцев в околорудном пространстве как следствие накопления золота и сопутствующих металлов при седиментации и/или предрудном инициирующем рудообразовании региональном метаморфизме и/или позднем (завершающем) магматогенном рудообразовании;
- обоснованность противопоставления по геолого-генетическим показателям месторождений, образованных в несланцевом и черносланцевом субстрате.

Корректное решение перечисленных вопросов возможно посредством разработки взамен применяемых в течение нескольких десятилетий, но, судя по числу исключаящих одно другое решений,

не оправдывающих себя методов, альтернативной методологии петролого-геохимических исследований, призванной обеспечить:

- дифференциацию минерального состава вмещающих месторождения горных пород на минеральные комплексы, отвечающие этапу их первоначального образования и каждому этапу последующих изменений, включая этап завершающего рудообразования;
- создание на этой основе рациональной поэтапной системы формирования выборок для балансовых и статистических расчетов, необходимых для реконструкции геологической истории петрогенных и рудогенных элементов в междрудном, околорудном пространстве как средства достижения главной цели петрохимии и геохимии – выяснения условий и масштабов миграции (концентрирования, рассеяния) химических элементов от этапа к этапу формирования итогового состава горных пород;
- сравнительный анализ результатов петролого-геохимических исследований рудовмещающего кристаллического и черносланцевого субстрата на предмет выяснения вещественно-генетической однородности или вещественно-генетических различий минеральных комплексов, образованных в том и другом субстрате месторождений золота (рисунок) на этапе рудообразования.

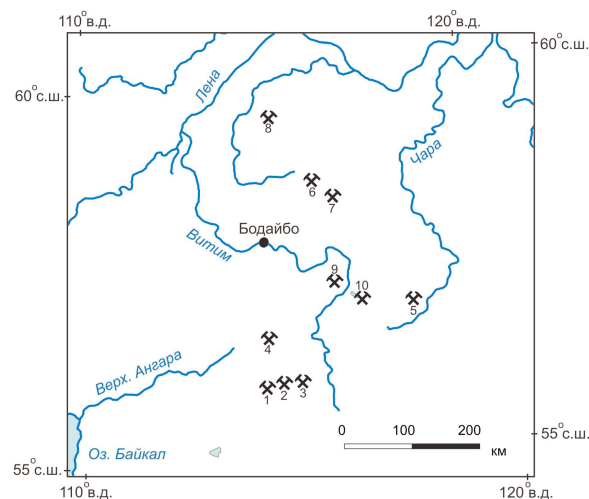


Рисунок. Схема расположения гидротермальных месторождений золота в юго-восточном горно-складчатом обрамлении Сибирского кратона: 1 – Западное; 2 – Ирокиндинское; 3 – Кедровское; 4 – Богодиканское; 5 – Верхне-Сакуканское; 6 – Сухоложское; 7 – Вернинское; 8 – Чертово Кoryто; 9 – Каралонское; 10 – Уряхское

Figure. Location of hydrothermal gold deposits in south-east mountain-folded framing of Siberian craton: 1 is Zapadnoe; 2 is Irokindinskoe; 3 is Kedrovskoe; 4 is Bogodikanskoe; 5 is Verkhne-Sakukanskoe; 6 is Sukholozhskoe; 7 is Verninskoe; 8 is Chertovo Koryto; 9 is Karalonskoe; 10 is Uryakhskoe

В результате выполненных петролого-геохимических исследований в околорудном пространстве, сложенном различными по составу, происхождению, возрасту кристаллическими породами и черносланцевыми толщами, оконтурены вскрытые на полную мощность или частично крупно- и мало-объемные околорудные метасоматические ореолы, установлены аутентичные минеральный состав, порядок минерало-петрохимической зональности, принадлежность околорудных метасоматических ореолов к сочетанию березитовой во внутренних и пропилитовой в периферийных зонах метасоматических колонок, дифференцированы по этапам образования минеральные комплексы, реконструированы причинно-следственные соотношения руд, околорудных геохимических ореолов с околорудными метасоматическими. Перечисленные данные обеспечили разработку типовой универсальной схемы минерало-петрохимической и геохимической зональности, составившей основу единой объемной петролого-геохимической модели околорудных метасоматических ореолов во вмещающем золоторудные месторождения кристаллическом и черносланцевом субстрате, обоснование и обсуждение которой составляет содержание статьи.

Методы исследования

Полевое изучение рудовмещающего субстрата и руд включало составление детальных, в масштабах 1:50–1:200, ориентированных вкрест простирания околорудных метасоматических ореолов и, как правило, выходящих за их пределы геологических разрезов на поверхности, в подземных горных выработках и скважинах протяженностью до многих сотен метров с отбором штучных проб массой в среднем 1,5...2,0 кг и интервалами между точками опробования от первых сантиметров до первых-многих метров.

Пробы тщательно очищались от загрязняющих продуктов, включая прожилки, дробились вручную на стальной плите и подвергались стиранию на виброистирателе. На каждой стадии обработки после каждой пробы инструмент промывался горячей водой и протирался белой тканью. Партии проб с ожидаемыми минимальными содержаниями металлов обрабатывались в первую очередь.

Пробы не сокращались и имели многоцелевое назначение – как базовые для отбора навесок для химического силикатного, атомно-абсорбционно-химико-спектрального и других анализов.

Полные химические (мокрые) силикатные анализы горных пород выполнены в Центральной лаборатории ПГО «ЗапСибгеология» и в Западно-Сибирском испытательном центре (г. Новокузнецк) под руководством И.А. Дубровской и Г.Н. Юминой. Содержание Au и Ag определялось атомно-абсорбционным методом, предел обнаружения $1 \cdot 10^{-8} \%$, в лаборатории ядерно-физических методов анализа вещества Объединенного Института геологии, геофизики и минералогии и в Аналити-

ческом центре Института геологии и минералогии СО РАН, аналитик В.Г. Цимбалит, содержание Hg – атомно-абсорбционным методом, предел обнаружения $5 \cdot 10^{-7} \%$, в Центральной лаборатории ПГО «Березовгеология» (г. Новосибирск), аналитик Н.А. Чариков.

Петрохимические пересчеты полных химических силикатных анализов горных пород выполнены по объемно-атомному методу.

Коэффициенты распределения (привноса, выноса) петрогенных элементов в метасоматических колонках – количественное выражение их баланса в объеме колонок – рассчитаны путем соотношения массы каждого элемента в стандартном объеме (10000 \AA^3) конкретной минерало-петрохимической зоны к массе его в том же объеме исходной породы. Введенный нами аддитивный показатель удельная масса перемещенного вещества (Δ), определяемый посредством соотношения общей массы в стандартном объеме перемещенного (привнесенного и вынесенного) в каждой зоне вещества (суммы масс элементов) к массе его в таком же стандартном объеме исходной породы, позволяет оценить интенсивность метасоматических преобразований химических составов пород в целом на количественной основе.

Расчеты статистических параметров распределения и баланса петрогенных и рудогенных элементов в околорудном пространстве выполнялись для частных метасоматических колонок и для литотипов (петротипов) пород в целом по золоторудным месторождениям с использованием двухуровневой системы петрохимических и геохимических выборок, составленных с учетом принадлежности проб к видам (разновидостям) исходных пород, а в слоистых толщах черных сланцев, кроме того, – к мусковит-биотитовой зоне дорудных ареалов регионального метаморфизма нагревания (нижний уровень), и к минеральным зонам околорудных метасоматических ореолов (верхний уровень).

Двухуровневая система выборок адекватна геологической ситуации, которая заключается в том, что плутонические (гранитоиды) и ультраметаморфические (гнейсы, мигматиты и др.) породы способны сохраняться в их первозданном виде бесконечно долго (миллиарды лет) и сохранились вплоть до этапа рудообразования, а толщи черных сланцев хотя и подверглись на дорудных этапах зональному региональному метаморфизму нагревания, но в изученных золоторудных месторождениях представляют обширную периферийную относительно низкотемпературную минеральную зону его ареалов, содержащую мусковит-биотитовый метаморфический парагенезис в сохранившихся состав и строение осадочных породах.

Анализ содержаний в породах металлов по атомно-абсорбционному методу сопровождался внутренним и внешним по химико-спектральному, нейтронно-активационному методам контролем (табл. 1).

Таблица 1. Оценка сходимости результатов определения разными методами содержания золота и серебра в породах

Table 1. Appraisal of results precision when determining gold and silver content in rocks using different methods

| Элементы Elements | Сравниваемые методы анализов Compared methods | Выборки Sampling | Интервалы содержаний, мг/т Content intervals, mg/t | | | | | | | | |
|----------------------|--|---------------------|---|----------|----|------------|----------|----|-----------|----------|----|
| | | | 0,5...10 | | | 10,1...100 | | | Более 100 | | |
| | | | Параметры/Parameters | | | | | | | | |
| | | п | δ | σ | п | δ | σ | п | δ | σ | |
| Au | AA-ААк | 1 | 88 | 1,2 | 23 | - | - | - | - | - | - |
| | | 2, 3, 4 | 136 | 0,8 | 18 | 5 | 6,3 | 26 | - | - | - |
| | AA-ХС | 1а | 55 | 2,2 | 46 | - | - | - | - | - | - |
| | | 5, 6, 7 | 126 | 2,6 | 51 | 14 | 40 | 61 | 12 | 3086 | 78 |
| AA-НА | 8 | 22 | 1,1 | 23 | - | - | - | - | - | - | |
| Ag | AA-ААк | 9 | 219 | 52 | 14 | - | - | - | - | - | - |
| | | 10 | 22 | 1,3 | 11 | 137 | 14 | 13 | 53 | 124 | 18 |

Примечание. Содержание Au и Ag определялось методами: всего массива проб, как отмечалось, атомно-абсорбционным (АА) с внутренним контролем (ААк), химико-спектральным (ХС), предел обнаружения $3 \cdot 10^{-8}$ %, в Центральной лаборатории ПГО «Читагеологоразведка», аналитик В.Н. Сысоева (г. Чита), нейтронно-активационным (НА), предел обнаружения $1 \cdot 10^{-8}$ %, в лаборатории ядерно-физических методов анализа НИИ ядерной физики при Томском политехническом университете, аналитик В.А. Чесноков. Выборки 1, 1а – углеродистые терригенные сланцы и метасоматиты по ним, остальные выборки – граниты, гнейсы, магматиты, габбро, долериты, вулканиты и метасоматиты по ним, выборка 9 включает пробы без дифференциации по содержанию металла. п – число пар сравниваемых анализов; δ – средняя квадратическая ошибка разности, мг/т; σ – средняя относительная ошибка по разностям двойных измерений, %. Расчеты выполнены Н.П. Ореховым.

Note. Au and Ag contents were determined by atomic absorption (AA) with inside control (AAk), chemical-spectral method, finding limit is $3 \cdot 10^{-8}$ %, in Central Laboratory «Chitageologorazvedka», the analyst is V.N. Sysoeva (Chita), neutron simulating (NA), finding limit is $1 \cdot 10^{-8}$ %, in the laboratory of nuclear-physical analytical method of the SRI nuclear physics at Tomsk polytechnic university, the analyst is V.A. Chesnokov. Samples 1, 1a are carbonaceous terrigenous slates and metasomatites by them, the rest samples – granites, gneisses, migmatites, gabbro, dolerites, volcanites and metasomatites by them, sample 9 includes the samples without differentiation by metal content. p is the number of pairs of the compared analyses; δ is the mean square error of difference, mg/t; σ is the mean relative error by the differences of double dimensions, %. The calculations were carried out by N.P. Orekhov.

В качестве меры сходимости результатов, полученных разными методами, использовалась средняя относительная ошибка по разностям двойных измерений, значения которой не зависят от содержания в пробах металлов. Поскольку относительная погрешность анализов не превышает, как правило, значений природной изменчивости содержания металлов, полученные аналитические данные оценены как пригодные для решения поставленных задач.

Распределение в околорудном пространстве золоторудных месторождений главных рудогенных элементов – геохимических и металлогенических спутников Au, Ag, Hg – характеризуют статистические параметры и коэффициенты.

Реализованная в рамках принятой методологии петролого-геохимических исследований система расчетов и сравнения их результатов обеспечила корректную оценку уровней металлоносности исходных рудовмещающих пород, в том числе метаморфизованных черных сланцев, по их видам, происхождению, возрасту, а также генетическую интерпретацию структуры околорудных геохимических ореолов, происхождения геохимических аномалий, взаимосвязей и взаимообусловленности околорудных метасоматических, геохимических ореолов и руд.

Разработанная петролого-геохимическая модель использована, в частности, в качестве эталонной при исследовании рудовмещающих гидротермально измененных черных сланцев позднерифейских хомолхинской, имняхской, аунакитской свит в Сухоложском и Вернинском месторождениях Ленского района [23, 24] в связи с тем, что поздние минеральные ассоциации этапа околорудного метасоматизма и рудообразования в черных сланцах Сухого Лога до сих пор [17], вслед за В.А. Буряком [10], идентифицируются с субфациями «регрессивного» регионального метаморфизма гидратации, что означает признание метасоматических пород метаморфическими.

Результаты исследования

Минеральная зональность околорудных метасоматических ореолов

В изученных золоторудных месторождениях образованы разнообъемные метасоматические ореолы, структура (зональность) и минералогическая петрохимические черты которых в различных породах, включая углеродистые сланцы, однообразны. Сохранившиеся в «останцах» исходные кристаллические породы (архейские и позднепалеозойские ультраметаморфиты, раннепротерозойские, палеозойские гранитоиды), как отмечалось, не приобретают минеральных новообразований до начала рудообразующих процессов в отличие от стратифицированных осадочных и вулканогенных пород, подвергшихся региональному метаморфизму разных фаций. Смена последних в пространстве определяет региональную метаморфическую зональность, в схеме которой расстояния между изоградами достигают многих километров. В противоположность околорудным метасоматическим ореолам минеральные зоны ареалов регионального метаморфизма не обнаруживают зависимости от положения относительно рудных тел, разломов и вообще различных зон повышенной проницаемости, и каждая из них занимает обширные пространства с постоянными минеральными составами. Например, черносланцевые толщи раннепротерозойской михайловской свиты в Патомском нагорье, позднерифейских кедровской, водораздельной, мухтунной свит в Северном Забайкалье, хомолхинской, имняхской, аунакитской, вачской, догал-

дынской свит Бодайбинского и Марокано-Илигирского прогибов в Ленском районе, вне локальных (вдоль глубинных разломов) рудовмещающих метасоматических ореолов, сложены углеродистыми сланцами, несущими однообразный мусковит-биотитовый метаморфический парагенезис, к которому в направлении к обрамляющим прогибы очагово-купольным ультраметаморфическим комплексам в смежных минеральных зонах ареалов регионального метаморфизма нагревания, например, добавляются гранат и другие высокотемпературные и высокобарические минералы.

Принадлежность поздних околорудных метасоматических ореолов к этапам рудообразования, то есть квалификация их как околорудных, доказывается порядком минералого-петрохимической зональности с закономерной сменой минералого-петрохимических зон по мере приближения к рудным телам и усилением в этом направлении степени минералого-химических преобразований пород внутри каждой зоны и от зоны к зоне.

Типовая универсальная метасоматическая колонка включает четыре минералого-петрохимических зоны – фронтальную, хлоритовую (эпидотовую, эпидот-хлоритовую), альбитовую, тыловую (табл. 2).

В зависимости от степени трещиноватости (проницаемости) пород мощность зон варьирует в широких пределах. Мощность наиболее крупнообъемной фронтальной зоны изменяется от метров – десятков метров в массивных кристаллических породах до многих сотен метров, иногда более – в трещиноватых высокопроницаемых породах. В последнем случае нередко ореолы соседних рудных тел сливаются своими фронтальными частями, образуя единый ореол рудного поля, как, например, это произошло в Сьюлбанской золоторудной зоне, насыщенной субпараллельными глубинными разломами. Напротив, в Верхне-Сакуканском, Богодиканском и некоторых других месторождениях в Северном Забайкалье, залегающих среди массивных гранитоидов, околорудные метасоматические ореолы, а следовательно, и фронтальная зона, более локальны и имеют мощность до нескольких десятков метров. Фронтальная (в некоторых случаях хлоритовая), альбитовая зоны дифференцированы на подзоны слабого, умеренного, интенсивного изменения с объемами минеральных новообразований во фронтальной зоне, например, соответственно 0...10, 10...20, 20...30 об. %. При расчете баланса петрогенных элементов в ореолах в отсутствие по объективным обстоятельствам не измененных в рудообразующих процессах пород это обеспечивает возможность соотносить изообъемные массы петрогенных элементов метасоматитов с соответствующими массами наименее измененных пород, в которых миграция вещества за пределы подзоны редко улавливается. Мощность хлоритовой (эпидотовой, эпидот-хлоритовой) зоны составляет десятки сантиметров ... де-

сятки метров, альбитовой – сантиметры ... первые метры, тыловой – сантиметры ... 1,5 метра.

В массивных (слабопроницаемых) породах, как правило, сохраняется порядок минералого-петрохимической зональности. Насыщенность блоков рудных полей зонами повышенной проницаемости, в том числе рудовмещающими, которые сложены и/или обрамляются наиболее измененными породами, определяет масштабы и частоту чередования минералого-петрохимических зон в поперечных разрезах ореолов. В этих случаях нарушается одноразовая смена минералого-петрохимических зон, но имеет место неоднократное повторение их в разных сочетаниях.

Обобщенная схема минеральной зональности околорудных метасоматических ореолов (колонок) включает следующие новообразованные минералы, в объеме каждой минералого-петрохимической зоны объединяемые в несколько парагенезисов (подчеркнуты минералы, исчезающие в более тыловых зонах).

Таблица 2. Порядок минеральной зональности околорудных метасоматических ореолов (колонок) мезотермальных месторождений золота

Table 2. Order of mineral zoning of near-ore metasomatic haloes (columns) of gold mesothermal deposits

| | |
|---|--|
| Фронтальная зона Frontal zone | Кварц+серицит+лейкоксен+рутил+магнетит±пирит±кальцит+альбит±кероген±хлориты±цоизит±актинолит±тремолит Quartz+sericite+leucoxene+rutile+magnetic iron oxide±pyrite±calcite+ albite±kerogen±chlorites±zoisite±actinolite±tremolite |
| Хлоритовая (эпидотовая, эпидот-хлоритовая) зона Chloritic (epidotic, epidote-chloritic) zone | Кварц+серицит+лейкоксен+рутил+магнетит+пирит±кальцит±доломит±сульфиды±золото, серебро+альбит±кероген±хлориты±цоизит±клиноцоизит±эпидот Quartz+sericite+leucoxene+rutile+magnetic iron oxide+pyrite±calcite± dolomite± sulphides±gold, silver+albite± kerogen± chlorites±zoisite± clinozoisite±epidote |
| Альбитовая зона Albitic zone | Кварц+серицит+лейкоксен+рутил+магнетит+пирит±кальцит±доломит-анкерит±сидерит±апатит±сульфиды±золото, серебро±кероген+альбит Quartz+sericite+leucoxene+rutile+magnetic iron oxide+pyrite±calcite± dolomite-ankerite±siderite±apatite±sulphides± gold, silver±kerogen+albite |
| Тыловая зона Rear zone | Кварц+серицит+лейкоксен+рутил+магнетит+пирит±кальцит±анкерит±сидерит±брейнерит±апатит±сульфиды±золото, серебро±кероген Quartz+sericite+leucoxene+rutile+magnetic iron oxide+pyrite±calcite± ankerite±siderite± breunnerite±apatite±sulphides± gold, silver±kerogen |

Примечание. Подчеркнуты минералы, исчезающие в более тыловой зоне.

Note. The minerals, disappearing in more rear zone are underlined.

В составе всего ансамбля новообразованных минералов участвуют «сквозные» минералы, присутствующие во всех минералого-петрохимических зонах, и те, которые исчезают в смежных более тыловых зонах. Границы между минералого-петрохимическими зонами бывают резкими (нитевидными) и постепенными. В последнем случае в более тыловой зоне на расстояниях до нескольких ... многих мм от границы массового исчезновения минерала еще сохраняются его редкие реликты.

В породах периферийных минералого-петрохимических зон ореолов, как правило, сохраняются свойственные исходным породам текстуры и структуры, во фронтальной зоне – в большей степени, в хлоритовой – в меньшей. Во внутренних альбитовой и березитовой зонах породы, в том числе апосланцевые метасоматиты, преобретают массивное сложение, лепидогранобластовую, гранолепидобластовую, лепидобластовую, порфиробластовую структуры.

Переход от фронтальной к смежной, более тыловой зоне на глубоких горизонтах выражается в полном растворении актинолита или тремолита, а при их отсутствии на верхних – одного-двух цветных минералов исходных пород, которые среди других минералов наиболее чувствительны к изменениям и по единичным наблюдениям растворяются одновременно с актинолитом или тремолитом. В числе замещающих эти минералы ассоциаций участвуют хлориты (брунсвит, делафоссит, рипидолит), чешуйки которых «загрязнены» скоплениями лейкоксена, рутила, образованных за счет титана, высвобождаемого при растворении исходных цветных минералов, и иногда образующих сагенитовую решетку. При дальнейшем замещении хлорита мусковитом в последнем скопления титановых минералов сохраняются, и по этому признаку метасоматический мусковит отличается от мусковита, образованного на этапе предшествующего регионального метаморфизма. Пластинки метаморфического мусковита чисты в архейских и позднепалеозойских ультраметаморфитах – альмандин-двуслюдяных парагнейсах, и в углеродистых терригенных сланцах позднерифейских кедровской, водораздельной, мухтунной, холмхинской, имняхской, аунакитской, вачской, догалдынской, раннепротерозойской михайловской свит.

Минералы эпидотовой группы, как и хлориты, участвующие в составе пород фронтальной зоны как незначительная примесь и не всегда, в смежной, более тыловой зоне в некоторых породах получают максимальное развитие, причем масса их в ореолах лавинообразно нарастает к внутренней границе зоны и эпидот при этом замещает доизит и клиноцоизит. Цоизит предпочтительно образуется за счет основных плагиоклазов, развиваясь в них первоначально в виде «оспелых» выделений. При участии в породах хлоритов и минералов эпидотовой группы последние исчезают в направлении к

более тыловой альбитовой зоне несколько раньше, чем хлориты, но обычно не далее, чем в нескольких сантиметрах от границы зон.

Типоморфный минерал альбитовой зоны альбит образуется вследствие деанортизации исходных плагиоклазов – слабой, в виде периферийных каемок, во фронтальной и почти полной – в альбитовой зонах.

Тыловая зона лишена альбита и сложена «сквозными» минералами, свойственными всему ореолу, масса которых возрастает от незначительной примеси на периферии до полного преобладания в этой зоне. К их числу относятся кварц, серицит и мусковит, карбонаты, пирит, лейкоксен и рутил, магнетит. Содержание кварца варьирует от единичных зерен в лиственитах, образованных за счет малокремнистых пород (кальцифиров и других), до десятков ... многих десятков об. % в большинстве метасоматитов.

Разнообразные по составу карбонаты подчиняются в ореолах единым для всех, в том числе изначально бескарбонатных, пород и для всех изученных месторождений закономерностям.

Во-первых, общая их масса прогрессивно нарастает в направлении к рудовмещающим зонам при постепенном одновременном укрупнении индивидов-ромбоздров до многих мм в поперечнике. При значительных объемах подвергшихся метасоматизму пород, например в Ленском районе, ареалы карбонатизации образуют в том числе и узкие лентовидные зоны, вытягивающиеся вдоль секущих складчатость разломных рудоносных структур [23, 24].

Во-вторых, состав карбонатов усложняется во внутренних и рудных зонах, сравнительно с периферией ореолов, а также во времени – от существенно известковых (кальцит) до железо-магнезиальных, преобладающих среди поздних новообразований.

Кероген в черных сланцах кедровской, водораздельной, мухтунной свит диагностирован как графит с незначительной долей (до 20 мас. %) неграфитизированной субстанции и с примесью битумоидов до 0,009 мас. %, в составе которых 60 мас. % приходится на углеводороды и 40 мас. % – на легкие смолы с преобладанием в последних кислот и эфиров. Прожилки мощностью до 2 см, секущие черные сланцы михайловской свиты в месторождении Чертово Кюрыто, сложены аморфным углеродистым веществом состава от антрацита до кокса.

Содержание керогена снижается во внутренних (альбитовой, березитовой) зонах вплоть до полного его исчезновения в апочерносланцевых осветленных до серого и белого цветов метасоматитах. Однако известны случаи (в Иркиндинском месторождении) заполнения тонкой «сыпью» графита былых кристаллов кальцита в апокальцифировых лиственитах, вследствие чего последние приобретают черный цвет.

В околорудном апосланцевом метасоматическом ореоле месторождения Чертово Кюрыто, в отличие от других участвующих в исследовании месторождений, кероген удален и из части объема промежуточной хлоритовой зоны, смежной с более тыловой также без керогена альбитовой зоной. Лишенные керогена осветленные до зеленовато-серого цвета породы, как обычно, утратили сланцевую, слойчатую текстуры, цементно-обломочную структуру, которые преобразованы, соответственно, в массивную и лепидогранобластовую, свойственные метасоматитам внутренних зон. Усиление интенсивности изменений пород сопровождалось существенными преобразованиями их химических составов (табл. 3). По перечисленным обстоятельствам типовая хлоритовая зона модели разделена на углеродистую, аутентичную хлоритовой с керогеном зоне апосланцевых околорудных метасоматических ореолов других месторождений, и собственно хлоритовую (без керогена).

Исследование рудовмещающего субстрата в соседних Сухоложском и Вернинском месторождениях в сравнительном аспекте с петролого-геохимической моделью околорудных метасоматических ореолов обеспечило идентификацию гидротермально измененных черных сланцев позднерифейских хомолхинской, имняхской (Сухой Лог), аунакитской (Вернинское месторождение) свит с многократно чередующимися в поперечных разрезах апосланцевых ореолов внутренними (альбитовой, тыловой – березитовой), на Западном участке Сухого Лога – с промежуточной хлоритовой и смежной альбитовой минералого-петрохимическими зонами [23, 24]. В обоих месторождениях крупнообъемные рудные залежи и минерализованные зоны прожилково-вкрапленных руд приурочены к упомянутым внутренним зонам, которые обрамлены более крупнообъемными безрудными хлоритовой и фронтальной минералого-петрохимическими зонами пропилиноподобных изменений, как правило, расположенными за пределами разведочных полигонов и не вскрытыми скважинами, вследствие чего недоступными для систематического опробования вне выветрелых (на поверхности) пород.

Увеличение массы сульфидов в породах хлоритовой, альбитовой, березитовой зон синхронно с усилением степени их преобразований с трансформацией цементно-обломочной структуры сравнительно слабо гидротермально измененных на этапах регионального метаморфизма нагревания и околорудного метасоматизма во фронтальной зоне бессульфидных сланцев в лепидогранобластовую структуру сульфидизированных апосланцевых метасоматитов.

Петрохимические черты околорудных метасоматических ореолов

Ведущие черты преобразований химических составов пород в обсуждаемых (табл. 3) и [23–26]

мезотермальных золоторудных месторождениях заключаются в почти полной замене в тыловой зоне ореолов относительно слабого основания натрия более сильным основанием калием, в частичном (до 50 мас. %) выносе из тыловых зон кремния, но поступлении в ореолы, преимущественно в их внутренние зоны, и фиксации значительных масс углекислоты, серы, отчасти калия. Эти изменения химического и минерального составов разных пород, повторяющиеся в мезотермальных золоторудных месторождениях мира, первоначально описаны в мировой литературе столетие назад и в дальнейшем приобрели статус типовых. Метасоматиты тыловой зоны ореолов, образованные в этих месторождениях в результате минералого-химических преобразований пород, в СССР получили название «березиты», в США – «вирджиниты». Тогда же было показано сочетание в объеме одного метасоматического ореола (метасоматической колонки) березита в тыловой зоне и пропилита в периферийных.

К числу типовых петрохимических черт пропилит-березитового процесса относится также отсутствие, как правило, признаков существенного удаления или поступления вещества на периферии ореолов, то есть во фронтальной и отчасти хлоритовой (эпидотовой, эпидот-хлоритовой) зонах, что согласуется с экспериментальными данными [27]. На примере обсуждаемых месторождений (табл. 3) видно, что величина удельной массы перемещенного вещества здесь, аккумулирующая в себе и фактор изначальной неравномерности распределения петрогенных элементов, даже в полосчатых парагнейсах с весьма неравномерным их распределением не превышает нескольких (до 10, редко 15) процентов. Большая часть минеральных новообразований в этих зонах формируется, очевидно, посредством перераспределения компонентов между замещаемыми и замещающими фазами. Вместе с тем в некоторых колонках (I, IV, V, VII, XI, XVI, XVIII, XIX–XXI) изменения химических составов исходных пород при метасоматизме значительны.

Судя по балансу масс петрогенных компонентов в ореолах и величине удельной массы перемещенного вещества, достигающей 50 мас. %, активная миграция их свойственна в основном внутренним зонам ореолов. В контрастных по химическому составу средах во всех, но особенно во внутренних зонах формирующихся околорудных метасоматических ореолов, происходит перемещение петрогенных элементов согласно градиентам их концентраций, доказывающее концентрационно-диффузионный механизм массопереноса в процессах околотрещинного (околоразломного) гидротермального метасоматизма [28].

Во внутренних зонах березит-пропилитовых колонок, в том числе апочерносланцевых, в ближайшем обрамлении (до 1,5 км) глубинных разломов формируются контрастные аномалии, помимо упомянутых элементов триады, других фемофиль-

Таблица 3. Коэффициенты распределения (КР) (выноса <1, привноса >1) петрогенных элементов в минералого-петрохимических зонах околорудных метасоматических ореолов гидротермальных золоторудных месторождений юго-восточного складчатого обрамления Сибирского кратона

Table 3. Coefficients of distribution (CD) (carry out <1, addition >1) of petrogenic elements in mineral-petrochemic zones of near-ore metasomatic haloes of hydrothermal gold deposits in South-East folded frame of Siberian craton

| Минералого-петрохимические зоны и подзоны (число проб) Mineral-Petrochemic zones and subzones (number of samples) | Химические элементы/Chemical elements | | | | | | | | | | | | | | | Δ |
|--|---------------------------------------|-----|------------|------------|-------------|------------------|------------|------------|------------------|------------------|------------|------------|------------|----------------|-----|------|
| | Si | Al | K | Na | S* | С _{кб.} | Ca | Mg | Fe ²⁺ | Fe ³⁺ | Ti | Mn | P | H ⁺ | O | |
| Кристаллический (несланцевый) субстрат/Crystal (non-shale) substratum | | | | | | | | | | | | | | | | |
| <i>Ирокиндинское месторождение/Irokindinskoe deposit</i> | | | | | | | | | | | | | | | | |
| <i>I. Альмандин-диопсид-двуполевошпатовые парагнейсы (AR, 9 проб)</i> | | | | | | | | | | | | | | | | |
| <i>I. Almandine-diopside-two-feldspathic paragneisses (AR, 9 samples)</i> | | | | | | | | | | | | | | | | |
| ФУ (23) | 1,1 | 1,1 | 1,7 | 1,3 | 3,8 | 0,8 | 0,7 | 1,0 | 1,2 | 0,9 | 1,1 | 1,0 | 1,1 | 1,3 | 1,0 | 8,0 |
| ФИ (14) | 1,1 | 1,1 | 1,7 | 1,2 | 2,1 | 0,7 | 0,6 | 1,0 | 1,1 | 1,0 | 1,1 | 0,8 | 1,4 | 2,3 | 1,0 | 11,2 |
| Х (11) | 1,0 | 1,0 | 2,3 | 1,4 | 1,5 | 1,6 | 0,4 | 1,5 | 1,2 | 0,6 | 1,1 | 0,6 | 0,9 | 3,7 | 1,0 | 13,9 |
| А (10) | 0,9 | 1,1 | 3,4 | 1,3 | 8,1 | 2,0 | 0,4 | 0,9 | 1,4 | 0,6 | 1,5 | 0,7 | 0,9 | 3,3 | 1,0 | 17,2 |
| Т (26) | 0,9 | 1,1 | 4,1 | 0,2 | 14,9 | 2,4 | 0,5 | 1,4 | 1,5 | 0,7 | 1,6 | 0,8 | 1,1 | 3,9 | 1,0 | 20,2 |
| <i>II. Альмандин-двуслюдяные парагнейсы (AR, 14 проб)/II. Almandine-two-mica paragneisses (AR, 14 samples)</i> | | | | | | | | | | | | | | | | |
| ФУ (9) | 0,9 | 1,1 | 1,1 | 0,9 | 1,1 | 1,2 | 1,3 | 1,5 | 1,1 | 1,1 | 1,1 | 1,5 | 1,4 | 1,6 | 1,0 | 5,6 |
| ФИ (11) | 1,0 | 1,0 | 1,0 | 0,9 | 0,9 | 1,4 | 0,7 | 1,2 | 1,0 | 1,4 | 1,2 | 1,1 | 0,8 | 2,5 | 1,0 | 4,0 |
| Х (7) | 1,0 | 1,0 | 1,0 | 0,7 | 2,2 | 4,0 | 0,9 | 1,2 | 1,0 | 1,5 | 1,2 | 1,1 | 0,9 | 2,3 | 1,0 | 5,3 |
| А (6) | 0,8 | 1,0 | 1,4 | 0,5 | 4,1 | 19 | 1,2 | 1,4 | 1,1 | 0,9 | 1,3 | 1,1 | 1,0 | 2,3 | 1,0 | 12,6 |
| Т (7) | 0,9 | 1,0 | 1,7 | 0,1 | 37 | 16 | 1,0 | 1,1 | 0,7 | 1,6 | 1,0 | 1,6 | 0,9 | 1,9 | 1,0 | 13,8 |
| <i>III. Кальцифилы (AR, 6 проб)/III. Calciphyres (AR, 6 samples)</i> | | | | | | | | | | | | | | | | |
| ФУ (13) | 1,0 | 1,0 | 0,9 | 1,2 | 1,5 | 1,0 | 1,0 | 1,0 | 1,2 | 0,7 | 1,0 | 1,8 | 1,1 | 0,9 | 1,0 | 2,9 |
| ФИ (7) | 1,0 | 1,0 | 1,3 | 1,0 | 5,5 | 1,0 | 0,9 | 1,0 | 0,9 | 0,6 | 1,1 | 1,3 | 1,2 | 3,0 | 1,0 | 4,8 |
| Х (6) | 0,7 | 0,8 | 1,0 | 0,6 | 3,5 | 1,4 | 1,0 | 0,9 | 0,9 | 0,7 | 1,0 | 0,8 | 1,1 | 1,6 | 1,0 | 9,5 |
| А (8) | 1,0 | 1,1 | 1,6 | 1,2 | 4,4 | 1,1 | 0,7 | 1,3 | 1,3 | 0,5 | 1,3 | 1,4 | 1,3 | 2,3 | 1,0 | 13,7 |
| Т (18) | 1,0 | 1,3 | 3,0 | 0,3 | 22 | 1,0 | 0,5 | 1,8 | 1,8 | 0,5 | 1,8 | 1,8 | 1,9 | 4,1 | 1,0 | 19,8 |
| <i>IV. Граниты мигматитовой выплавки (AR, 7 проб)/IV. Granites of migmatitic melting (AR, 7 samples)</i> | | | | | | | | | | | | | | | | |
| ФУ (5) | 1,0 | 1,0 | 0,9 | 1,0 | 0,2 | 2,5 | 1,1 | 1,2 | 0,9 | 1,3 | 0,8 | 0,5 | 0,8 | 3,1 | 1,0 | 1,2 |
| ФИ (6) | 1,0 | 1,0 | 0,9 | 1,1 | 0,3 | 4,9 | 1,7 | 1,5 | 1,1 | 2,1 | 0,9 | 1,5 | 1,1 | 2,1 | 1,0 | 3,1 |
| Х (10) | 0,9 | 1,1 | 0,6 | 1,6 | 0,1 | 11 | 1,6 | 1,6 | 0,9 | 1,7 | 0,6 | 0,9 | 1,5 | 3,7 | 1,0 | 6,9 |
| А (9) | 1,0 | 1,1 | 0,8 | 1,0 | 7,6 | 17 | 1,0 | 1,7 | 1,0 | 1,6 | 1,7 | 1,6 | 3,5 | 5,2 | 1,0 | 4,5 |
| Т (8) | 0,9 | 1,1 | 1,2 | 0,1 | 20 | 51 | 2,6 | 3,3 | 1,6 | 3,6 | 3,5 | 1,7 | 7,5 | 11 | 1,1 | 18,8 |
| <i>V. Дайковые фельзитовые умеренно щелочные биотитовые микрогранит-порфиры (PZ₃, 5 проб)</i> | | | | | | | | | | | | | | | | |
| <i>V. Dike felsitic moderately alkaline biotitic microgranite porphyry (PZ₃, 5 samples)</i> | | | | | | | | | | | | | | | | |
| Х (4) | 0,9 | 1,1 | 1,1 | 1,0 | 0,4 | 2,4 | 2,2 | 2,8 | 2,7 | 1,6 | 3,8 | 3,1 | 2,9 | 1,3 | 1,0 | 12,6 |
| А (6) | 0,7 | 1,1 | 1,7 | 0,5 | 1,2 | 4,0 | 3,4 | 4,3 | 4,3 | 1,8 | 6,0 | 4,3 | 4,1 | 2,9 | 1,0 | 27,0 |
| Т (6) | 0,7 | 1,2 | 2,6 | 0,1 | 20,1 | 4,9 | 4,5 | 4,9 | 3,1 | 5,5 | 6,2 | 4,6 | 3,3 | 1,5 | 1,0 | 36,8 |
| <i>Кедровское месторождение/Kedrovskoe deposit</i> | | | | | | | | | | | | | | | | |
| <i>VI. Габбро муйского комплекса (R₃, 1 проба)/VI. Gabbro of muisk complex (R₃, 1 sample)</i> | | | | | | | | | | | | | | | | |
| Х (4) | 0,9 | 1,0 | 1,5 | 2,4 | 24 | 2,2 | 0,6 | 0,9 | 1,2 | 0,7 | 1,3 | 0,8 | 1,7 | 0,9 | 1,0 | 10,6 |
| А (2) | 0,9 | 1,0 | 1,9 | 1,6 | 83 | 2,7 | 0,5 | 0,6 | 1,2 | 0,8 | 1,9 | 0,9 | 1,4 | 0,4 | 1,0 | 13,2 |
| Т (2) | 0,6 | 1,1 | 2,5 | 0,5 | 77 | 5,7 | 1,1 | 1,4 | 1,7 | 1,0 | 1,3 | 1,2 | 1,9 | 0,6 | 1,0 | 22,6 |
| <i>VII. Альмандин-двуслюдяные плагиоклазовые парагнейсы Кедровской очагово-купольной постройки (PZ₃, 1 проба)</i> | | | | | | | | | | | | | | | | |
| <i>VII. Almandine-two-mica plagioclase paragneisses of Kedrovskaya chamber-dome structure (PZ₃, 1 sample)</i> | | | | | | | | | | | | | | | | |
| ФУ (1) | 1,0 | 1,0 | 1,7 | 0,5 | 0,5 | 0,5 | 0,9 | 1,1 | 1,4 | 1,4 | 0,9 | 0,7 | 2,4 | – | 1,0 | 7,0 |
| Х (1) | 1,0 | 1,1 | 1,1 | 0,8 | 2,6 | 0,7 | 1,4 | 0,5 | 1,2 | 1,4 | 1,1 | 0,6 | 1,7 | – | 1,0 | 6,0 |
| Т (1) | 0,5 | 0,5 | 1,3 | 0,1 | 22 | 14 | 8,1 | 5,4 | 1,7 | 1,6 | 2,0 | 1,4 | 7,5 | – | 1,0 | 45,0 |
| <i>VIII. Кварцевые диориты Кедровской очагово-купольной постройки (PZ₃, 6 проб)</i> | | | | | | | | | | | | | | | | |
| <i>VIII. Quartz diorites of Kedrovskaya chamber-dome structure (PZ₃, 6 samples)</i> | | | | | | | | | | | | | | | | |
| Х (1) | 1,0 | 1,0 | 0,8 | 1,0 | 1,5 | 4,8 | 1,0 | 1,1 | 1,2 | 0,7 | 1,0 | 1,1 | 0,9 | 1,5 | 1,0 | 3,0 |
| А (5) | 1,0 | 1,0 | 1,0 | 0,9 | 8,9 | 14 | 1,0 | 0,8 | 1,0 | 0,3 | 0,9 | 0,8 | 0,9 | 1,3 | 1,0 | 6,0 |
| Х (16) | 1,0 | 1,0 | 1,0 | 1,0 | 11,1 | 10 | 1,0 | 1,0 | 1,0 | 0,9 | 1,0 | 1,1 | 1,0 | 1,5 | 1,0 | 4,0 |
| А (6) | 0,9 | 0,9 | 1,2 | 0,9 | 32,7 | 22 | 1,3 | 1,5 | 1,6 | 0,7 | 1,9 | 1,4 | 1,5 | 1,1 | 1,0 | 12,0 |
| Т (1) | 0,5 | 0,8 | 1,4 | 0,2 | 428 | 48 | 3,2 | 3,4 | 2,7 | 4,2 | 2,7 | 3,4 | 2,6 | 0,3 | 1,1 | 41,0 |

Продолжение табл. 3.

Table 3.

| Минералого-петрохимические зоны и подзоны (число проб) Mineral-Petrochemic zones and subzones (number of samples) | Химические элементы/Chemical elements | | | | | | | | | | | | | | | Δ |
|--|---------------------------------------|-----|------------|-----|-------------|------------------|------------|------------|------------------|------------------|------------|------------|------------|----------------|-----|------|
| | Si | Al | K | Na | S* | C _{кб.} | Ca | Mg | Fe ²⁺ | Fe ³⁺ | Ti | Mn | P | H ⁺ | O | |
| <i>IX. Дайковые кварцевые диориты Кедровской очагово-купольной постройки (PZ₃, 7 проб)</i> <i>IX. Dike quartz diorites of Kedrovskaya chamber-dome structure (PZ₃, 7 samples)</i> | | | | | | | | | | | | | | | | |
| X (17) | 1,0 | 1,0 | 1,0 | 1,0 | 5,4 | 9,1 | 1,0 | 0,9 | 1,1 | 0,6 | 1,0 | 1,0 | 0,9 | 1,3 | 1,0 | 4,1 |
| A (22) | 0,9 | 1,0 | 1,2 | 0,8 | 14,0 | 17 | 1,2 | 1,2 | 1,5 | 0,6 | 1,3 | 1,2 | 1,3 | 1,2 | 1,0 | 9,3 |
| T (2) | 0,7 | 0,9 | 1,5 | 0,2 | 117 | 34 | 2,4 | 2,7 | 2,4 | 1,6 | 2,1 | 2,4 | 2,3 | 1,0 | 1,0 | 29,7 |
| <i>Западное месторождение/Западное deposit</i> | | | | | | | | | | | | | | | | |
| <i>X. Габбро муйского комплекса (R₃, 6 проб)/X. Gabbro of muisk complex (R₃, 6 samples)</i> | | | | | | | | | | | | | | | | |
| X (3) | 0,9 | 0,9 | 1,2 | 1,1 | 1,0 | 17 | 1,0 | 0,5 | 1,1 | 0,7 | 0,9 | 0,9 | 0,9 | 1,3 | 1,0 | 8,6 |
| A (1) | 0,9 | 0,9 | 2,6 | 1,3 | 0,7 | 31 | 0,8 | 0,4 | 1,0 | 0,2 | 0,7 | 0,8 | 0,8 | 0,9 | 1,0 | 14,0 |
| T (1) | 0,8 | 1,0 | 6,7 | 0,1 | 1,7 | 42 | 1,2 | 0,8 | 1,2 | 0,2 | 1,1 | 0,8 | 0,7 | 1,5 | 1,1 | 23,5 |
| <i>XI. Дайковые долериты (PZ₃, 8 проб)/XI. Dike dolerites (PZ₃, 8 samples)</i> | | | | | | | | | | | | | | | | |
| X (9) | 0,9 | 0,9 | 2,2 | 1,0 | 0,8 | 10 | 0,9 | 0,8 | 0,9 | 0,5 | 0,9 | 0,8 | 0,6 | 0,9 | 1,0 | 11,0 |
| A (2) | 0,8 | 0,9 | 5,4 | 0,5 | 1,3 | 15 | 0,8 | 0,9 | 1,1 | 0,1 | 0,9 | 0,8 | 0,6 | 1,0 | 1,1 | 20,0 |
| T (5) | 0,8 | 0,8 | 6,5 | 0,1 | 1,6 | 16 | 0,9 | 1,0 | 1,0 | 0,4 | 0,8 | 0,6 | 0,5 | 1,3 | 1,1 | 21,0 |
| <i>Петелинское кварцево-жильное поле/Petelinskoe quartz-vein field</i> | | | | | | | | | | | | | | | | |
| <i>XII. Покровные кварцевые порфиры келянской свиты (R₃, 5 проб)/XII. Cover quartz porphyry of kelyanskaya suite (R₃, 5 samples)</i> | | | | | | | | | | | | | | | | |
| X (4) | 1,0 | 1,0 | 0,9 | 1,0 | 2,3 | 3,0 | 0,8 | 0,6 | 0,8 | 1,0 | 0,9 | 1,1 | 0,9 | 0,7 | 1,0 | 3,3 |
| A* (6) | 1,1 | 1,0 | 1,1 | 0,9 | 2,4 | 4,6 | 0,6 | 0,5 | 0,8 | 0,4 | 0,9 | 0,7 | 0,6 | 0,6 | 1,0 | 6,8 |
| A** (3) | 0,8 | 1,1 | 2,1 | 0,5 | 3,4 | 17 | 1,7 | 2,6 | 1,8 | 0,8 | 1,3 | 1,7 | 1,6 | 1,7 | 1,0 | 20,3 |
| <i>XIII. Покровные базальтовые порфиры келянской свиты (R₃, 2 пробы)</i> <i>XIII. Cover basalt porphyrites of kelyanskaya suite (R₃, 2 samples)</i> | | | | | | | | | | | | | | | | |
| X (4) | 0,9 | 0,9 | 1,6 | 0,9 | 2,2 | 16 | 0,7 | 0,8 | 1,0 | 0,4 | 0,9 | 0,7 | 0,8 | 0,8 | 1,0 | 11,1 |
| A (2) | 0,8 | 0,8 | 3,3 | 0,6 | 38 | 25 | 0,8 | 0,6 | 1,5 | 0,5 | 1,8 | 1,2 | 4,2 | 1,0 | 1,1 | 23,9 |
| T (1) | 0,6 | 0,9 | 5,2 | 0,1 | 19 | 29 | 1,4 | 0,8 | 0,9 | 0,6 | 0,8 | 0,8 | 0,5 | 2,3 | 1,1 | 29,4 |
| <i>Богодиканское месторождение/Bogodikanskoe deposit</i> | | | | | | | | | | | | | | | | |
| <i>XIV. Дайковые долериты (PZ₃, 16 проб)/XIV. Dike dolerites (PZ₃, 16 samples)</i> | | | | | | | | | | | | | | | | |
| X (4) | 0,9 | 0,9 | 1,3 | 0,8 | 0,8 | 29 | 0,8 | 1,1 | 0,9 | 0,6 | 0,8 | 0,9 | 0,7 | 1,3 | 1,0 | 12,5 |
| A (1) | 0,8 | 0,7 | 2,2 | 0,6 | 0,6 | 51 | 0,8 | 0,9 | 1,1 | 0,3 | 0,9 | 1,0 | 0,8 | 0,7 | 1,1 | 20,7 |
| T (2) | 0,8 | 0,9 | 3,1 | 0,1 | 0,9 | 42 | 0,9 | 1,0 | 1,0 | 0,3 | 0,7 | 0,8 | 0,6 | 1,4 | 1,1 | 19,3 |
| <i>Верхне-Сакуканское месторождение/Verkhne-Sakukanskoe deposit</i> | | | | | | | | | | | | | | | | |
| <i>XV. Кварцевые диориты и кварцевые монзониты кодарского комплекса (PR₁, 6 проб)</i> <i>XV. Quartz diorites and quartz monzonites of kodar complex (PR₁, 6 samples)</i> | | | | | | | | | | | | | | | | |
| ФУ (5) | 1,0 | 0,9 | 1,0 | 0,8 | 1,4 | 6,1 | 0,8 | 1,1 | 1,1 | 1,2 | 1,1 | 1,1 | 1,0 | 1,4 | 1,0 | 3,7 |
| X (1) | 1,0 | 0,9 | 0,8 | 0,8 | 3,2 | 19 | 0,9 | 1,0 | 0,9 | 0,6 | 1,0 | 1,0 | 0,9 | 1,7 | 1,0 | 6,0 |
| A (4) | 0,9 | 1,0 | 1,4 | 0,6 | 1,7 | 32 | 1,2 | 1,3 | 0,8 | 0,9 | 1,1 | 1,3 | 1,0 | 1,6 | 1,0 | 9,6 |
| T (1) | 0,8 | 0,9 | 1,1 | 0,1 | 3,4 | 79 | 2,0 | 5,2 | 1,2 | 0,7 | 0,8 | 2,7 | 0,9 | 2,2 | 1,1 | 26,6 |
| Регионально-метаморфизованные углеродистые терригенные сланцевые толщи Regional metamorphosed carbonaceous terrigenous slates terranes <i>Кедровское месторождение/Kedrovskoe deposit</i> | | | | | | | | | | | | | | | | |
| <i>XVI. Углеродистые мусковит-биотитовые полевошпат-кварцевые песчано-алевро-сланцы кедровской свиты (R₃, 10 проб), залежь метасоматитов типа «слоеного пирога», мощность 220 м</i> <i>XVI. Carbonaceous muscovite-biotitic feldspar-quartz sandstone-aleuro-slates of kedrovskaya suite (R₃, 10 samples), lode of metasomatites, thickness 220 m</i> | | | | | | | | | | | | | | | | |
| ФИ (4) | 1,0 | 1,1 | 1,3 | 0,8 | – | 1,9 | 0,9 | 1,5 | 1,4 | 1,5 | 1,1 | 0,9 | 1,2 | 1,3 | 1,0 | 6,2 |
| X (51) | 0,9 | 1,0 | 0,9 | 0,7 | 62 | 8,7 | 1,9 | 1,8 | 1,5 | 1,0 | 1,2 | 1,7 | 0,6 | 1,9 | 1,0 | 8,1 |
| A (73) | 1,0 | 1,0 | 1,1 | 0,8 | 67 | 13 | 1,9 | 1,0 | 1,3 | 0,7 | 1,0 | 1,5 | 0,4 | 1,3 | 1,0 | 6,6 |
| T (8) | 0,9 | 1,0 | 1,5 | 0,1 | 128 | 20 | 3,4 | 1,9 | 1,3 | 1,0 | 1,4 | 1,8 | 1,3 | 1,9 | 1,0 | 16,2 |

Окончание табл. 3.

Table 3.

| Минералого-петрохимические зоны и подзоны (число проб) Mineral-Petrochemic zones and subzones (number of samples) | Химические элементы/Chemical elements | | | | | | | | | | | | | | | Δ |
|--|---------------------------------------|-----|------------|------------|------------|------------------|------------|------------|------------------|------------------|------------|------------|------------|----------------|-----|------|
| | Si | Al | K | Na | S* | C _{кб.} | Ca | Mg | Fe ²⁺ | Fe ³⁺ | Ti | Mn | P | H ⁺ | O | |
| XVII. Углеродистые мусковит-биотитовые полевошпат-кварцевые песчано-алевро-сланцы кедровской свиты (R ₃ , 1 проба), ореол в обрамлении золотоносной кварцевой жилы XVII. Carbonaceous muscovite-biotitic feldspar-quartz sandstone-aleuro-slates of kedrovskaya suite (R ₃ , 1 sample), the haloes in the frame of gold-bearing quartz vein | | | | | | | | | | | | | | | | |
| A (1) | 0,8 | 1,0 | 3,5 | 0,7 | + | 20 | 1,3 | 12 | 3,8 | 4,4 | 1,8 | 4,7 | 4,0 | 6,6 | 1,0 | 18,0 |
| T (1) | 0,6 | 1,1 | 5,5 | 0,1 | + | 70 | 9,8 | 19 | 5,5 | 2,3 | 1,7 | 4,5 | 7,7 | 15 | 1,0 | 43,0 |
| Каралонское месторождение/Karalonskoe deposit | | | | | | | | | | | | | | | | |
| XVIII. Углеродистые мусковит-биотитовые полевошпат-кварцевые песчано-алевро-сланцы водораздельной свиты (R ₃ , 2 пробы) XVIII. Carbonaceous muscovite-biotitic feldspar-quartz sandstone-aleuro-slates of vodorazdelnaya suite (R ₃ , 2 samples) | | | | | | | | | | | | | | | | |
| ФИ (8) | 0,8 | 1,0 | 0,7 | 0,8 | 2,1 | 4,5 | 3,2 | 4,0 | 2,2 | 1,9 | 1,4 | 2,2 | 0,7 | 1,2 | 1,0 | 17,9 |
| X* (7) | 0,7 | 1,0 | 1,2 | 0,5 | 2,7 | 8,2 | 3,8 | 3,7 | 3,0 | 1,6 | 1,5 | 3,2 | 0,3 | 1,0 | 1,0 | 24,8 |
| X** (6) | 0,7 | 1,1 | 1,2 | 0,5 | 6,5 | 7,4 | 3,4 | 3,7 | 3,1 | 2,0 | 1,8 | 3,0 | 0,3 | 1,6 | 1,0 | 26,4 |
| T (3) | 0,9 | 1,1 | 2,2 | 0,1 | 44 | 3,9 | 1,7 | 2,7 | 2,6 | 1,0 | 1,6 | 1,0 | 0,3 | 1,7 | 1,0 | 20,5 |
| Месторождение Чертово Корыто/Chertovo Koryto deposit | | | | | | | | | | | | | | | | |
| XIX. Углеродистые мусковит-биотитовые полевошпат-кварцевые крупнозернистые алевро-сланцы михайловской свиты (PR ₁ , 3 пробы) XIX. Carbonaceous muscovite-biotitic feldspar-quartz big-grain sandstone-slates of mikhaylovskaya suite (PR ₁ , 3 samples) | | | | | | | | | | | | | | | | |
| У (2) | 1,0 | 1,0 | 1,0 | 0,9 | 0,7 | 0,9 | 1,5 | 1,2 | 1,0 | 1,3 | 1,1 | 1,0 | 1,0 | – | 1,0 | 2,9 |
| X (8) | 0,8 | 0,7 | 0,7 | 0,3 | 2,2 | 15 | 13 | 2,0 | 1,7 | 1,1 | 6,4 | 6,6 | 9,4 | – | 1,1 | 29,7 |
| T (1) | 0,6 | 0,7 | 0,9 | 0,1 | 1,0 | 29 | 20 | 2,7 | 1,3 | 0,1 | 6,7 | 22 | 10 | – | 1,1 | 43,4 |
| XX. Углеродистые мусковит-биотитовые полевошпат-кварцевые мелкозернистые песчано-сланцы михайловской свиты (PR ₁ , 3 пробы) XX. Carbonaceous muscovite-biotitic feldspar-quartz fine-grain sandstone-slates of mikhaylovskaya suite (PR ₁ , 3 samples) | | | | | | | | | | | | | | | | |
| У (1) | 1,0 | 1,0 | 0,7 | 1,8 | 2,8 | 1,4 | 1,3 | 1,1 | 1,0 | 0,8 | 1,3 | 2,0 | 0,7 | – | 1,0 | 3,5 |
| У (3) | 1,0 | 1,1 | 0,8 | 1,1 | 2,3 | 2,0 | 1,8 | 2,2 | 1,3 | 1,7 | 1,2 | 2,5 | 1,0 | – | 1,0 | 6,5 |
| X (6) | 0,6 | 1,0 | 0,8 | 0,3 | 5,3 | 20 | 15 | 4,3 | 2,6 | 1,3 | 9,2 | 19 | 9,9 | – | 1,0 | 34,9 |
| T (1) | 0,7 | 0,9 | 0,9 | 0,1 | 1,1 | 21 | 14 | 3,6 | 2,1 | 2,8 | 8,9 | 37 | 9,7 | – | 1,0 | 32,5 |
| XXI. Углеродистые мусковит-биотитовые полевошпат-кварцевые разнозернистые песчано-сланцы михайловской свиты (PR ₁ , 3 пробы) XXI. Carbonaceous muscovite-biotitic feldspar-quartz various-grain sandstone-slates of mikhaylovskaya suite (PR ₁ , 3 samples) | | | | | | | | | | | | | | | | |
| У (1) | 1,0 | 1,0 | 1,7 | 0,3 | 12 | 1,1 | 0,6 | 2,1 | 1,6 | 1,9 | 1,3 | 1,0 | 0,5 | – | 1,0 | 7,9 |
| X (4) | 0,7 | 0,9 | 1,0 | 0,2 | 17 | 15 | 6,1 | 5,2 | 3,4 | 1,8 | 9,4 | 7,0 | 5,5 | – | 1,0 | 31,4 |
| T (1) | 0,5 | 0,7 | 0,9 | 0,1 | 67 | 33 | 14 | 7,9 | 3,5 | 5,9 | 5,9 | 47 | 7,4 | – | 1,0 | 55,6 |

Примечание. I–XXI – исходные породы вне и в подзоне слабого изменения фронтальной зоны. Минеральные зоны и подзоны околорудных метасоматических ореолов: ФУ, ФИ – подзоны умеренного и интенсивного изменения фронтальной зоны; У, X, А, Т – углеродистая, хлоритовая (эпидотовая, эпидот-хлоритовая), альбитовая и тыловая (березитовая, листвени́товая) зоны, * – умеренного, ** – интенсивного изменения. S* – сера сульфидная, H⁺ – водород воды H₂O⁺. Δ – удельная масса перемещенного (привнесенного и вынесенного) вещества в отношении к массе вещества исходной породы в стандартном геометрическом объеме 10000 Å³. Жирным шрифтом выделены контрастные (КР>1,5) аномалии химических элементов.

Note. I–XXI are the initial rocks outside and in subzone of weak alteration of frontal zone. Mineral zones and subzones of near-ore metasomatic haloes: ФУ, ФИ are the subzones of moderate and intensive alteration of frontal zone; У, X, А, Т are the carbonaceous, chloritic (epidotic, epidot-chloritic), albitic and rear (beresite, listvenite) zones, * – moderate, ** – intensive alteration. S* is the sulfide sulphur, H⁺ is the hydrogen of water H₂O⁺. Δ is the specific weight of the removed (added and carried out) substance in relation to the weight of the initial rock substance in standard geometric measurement 10000 Å³. Contrast (CD>1,5) anomalies of chemical elements are put in bold type.

ных элементов – фосфора, титана, магния, кальция, железа, марганца [8, 29], содержания которых, как и титана в пирите березитов, снижаются до кларковых уровней по мере удаления от глубинных разломов [29].

Все поступающие петрогенные элементы фиксируются в минералах, образованных и за счет собственных ресурсов исходных пород. Калий входит в состав серицита, восстановленный углерод – ке-

рогена, окисленный углерод, кальций, магний, железо, марганец – в основном карбонатов, отчасти хлоритов, титан – лейкоксена, рутила, фосфор – апатита. Исключение составляют сера и углерод в случаях поступления в бессульфидные и бескарбонатные породы. Оба элемента, очевидно, в силу высокой подвижности способны проникать в наиболее удаленную от раствороподводящих каналов-разломов фронтальную зону.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Gold and metals enrichment in natural granitic melts during fractional crystallization / R. Mustard, T. Ulrich, V.S. Kamenetsky, T. Mernagh // *Geology*. – 2006. – V. 34. – № 2. – P. 82–88.
2. Гусев А.И. Петрология золотогенерирующего магматизма. – М.: Изд-во РАН, 2012. – 160 с.
3. The Vilalba gold district, a new discovery in the Variscan terranes of the NW Spain: a geologic, fluid inclusions and stable isotope study / Martinez-Abad, A. Sepedal, D. Arias, A. Martin-Isard // *Ore Geology Reviews*. – 2015. – V. 66. – P. 344–365.
4. Ta Nang gold deposit in the black shales of Central Vietnam / Tuan Tran Anh, I.V. Gaskov, Trong Tran Hoa, A.S. Borisenko, A.E. Izokh, Pham Thi Dung, Hoang Yu Li, Nguyen Thi Nai // *Russian Geology and Geophysics*. – 2015. – V. 56. – № 10. – P. 1414–1427.
5. Состав метасоматических минералов золоторудного месторождения Сухой Лог как критерий его генетической связи с базит-гипербазитовым магматизмом / В.Л. Русинов, О.В. Русинова, С.Е. Борисовский, Е.И. Альшвева // *Доклады РАН*. – 2006. – Т. 405. – № 5. – С. 661–665.
6. Комаров П.В., Томсон И.Н. О плюмах и их влиянии на формирование благороднометалльного оруденения в углеродсодержащих породах // *Доклады РАН*. – 2007. – Т. 415. – № 6. – С. 779–781.
7. Carbon isotope studies of auriferous quartz carbonate veins from two orogenic gold deposits from the Neoproterozoic Chitradurga schist belt, Dharwar craton, India: evidence for mantle magmatic source of auriferous fluid / S. Sarangi, A. Sarkar, R. Srinivasan, S.C. Patel // *J. Asian Earth Sci.* – 2012. – V. 52. – P. 1–11.
8. Kucherenko I.V., Gavrilov R.Yu. Femophilic elements in wall-rock metasomatites and in ores of mesothermal gold deposits – newsletter of mantle deep // *International Journal of Applied and Fundamental Research*. – 2011. – № 1. – P. 37–43.
9. Kucherenko I.V., Zhang Yuxuan. Metallogenic problems of hydrothermal gold deposit formation: facts and arguments // *IOP Conf. Series: Earth and Environmental Science*. – 2015. – V. 24. URL: http://iopscience.iop.org/1755-1315/24/1/012024/pdf/1755-1315_24_1_012024.pdf (дата обращения: 10.03.2016).
10. Буряк В.А., Хмельевская Н.М. Сухой Лог – одно из крупнейших золоторудных месторождений мира. – Владивосток: Дальнаука, 1997. – 156 с.
11. Goldberg J.S., Abramson G., Los V.L. Depletion and enrichment of exploration for mineral deposits // *Geochemistry Exploration, Environment Analysis*. – 2003. – V. 3. – P. 281–293.
12. Metallogeny of gold deposits of China / Shao Jun, Hui De-feng, Kong Xiang-min, Shou Nai-wu // *Geology and Resources*. – 2004. – V. 13. – № 4. – P. 246–250.
13. Multistage sedimentary and metamorphic origin of pyrite and gold in the giant Sukhoi Log deposit, Lena gold province, Russia / R.R. Large, V.V. Maslennikov, R. Francois, L.V. Danyushevsky, Chang Zhao Shan // *Economic Geology*. – 2007. – V. 102. – № 7. – P. 1233–1267.
14. Age and pyrite-Pb-isotopic composition of the giant Sukhoi Log Sediment-hosted gold deposit, Russia / S. Meffre, R.R. Large, R. Scott, J. Woodhead, Z. Chang, S.E. Gilbert, L.V. Danyushevsky, V. Maslennikov, J.M. Hergt // *Geochim. et Cosmochim. Acta*. – 2008. – V. 72. – P. 2377–2391.
15. Кряжев С.Г., Устинов В.И., Гриненко В.А. Особенности флюидного режима формирования золоторудного месторождения Сухой Лог по изотопно-геохимическим данным // *Геохимия*. – 2009. – № 10. – С. 1108–1117.
16. Изотопный состав свинца по данным высокоточного ICP MS-метода и источники вещества крупномасштабного благороднометалльного месторождения Сухой Лог (Россия) / И.В. Чернышов, А.В. Чугаев, Ю.Г. Сафонов, М.Р. Сароян, М.А. Юдовская, А.В. Еремина // *Геология рудных месторождений*. – 2009. – Т. 51. – № 6. – С. 550–559.
17. Соотношение процессов метаморфизма и рудообразования на золотом черносланцевом месторождении Сухой Лог по данным U-Th-Pb-изотопного SHRIMP-датирования акцессорных минералов / М.А. Юдовская, В.В. Дистлер, Н.В. Родионов, А.В. Мохов, А.В. Антонов, С.А. Сергеев // *Геология рудных месторождений*. – 2011. – Т. 53. – № 1. – С. 32–64.
18. The noble metal distribution in the black shales of the Degdekan Gold Deposit in Northeast Russia / A.I. Khanchuk, L.P. Plyusnina, E.M. Nikitenko, T.B. Kurmina, N.N. Barinov // *Russia Journal of Pacific Geology*. – 2011. – V. 5. – № 2. – P. 89–96.
19. Gold mineralization in Proterozoic black shales: example from the Haoyaoerhudong gold deposit, northern margin of the North China Craton / Wang Jianping, Liu Jiajun, Peno Runmin, Liu Zhenjiang, Zhao Baisheng, Li Zan, Wang Yufeng, Lui Chonghao // *Ore Geology Reviews*. – 2014. – V. 63. – P. 150–159.
20. Synsedimentary to early diagenetic gold in black shale-hosted pyrite nodules at the Golden Mile Deposit, Kalgoorlie, Western Australia / J.A. Steadman, R.R. Large, S. Meffre, P.H. Olin, L.V. Danyushevsky, D.D. Gregory, I. Belousov, E. Lounejeva, T.R. Ireland, P. Holden // *Economic Geology*. – 2015. – V. 110. – № 5. – P. 1157–1191.
21. Геодинамические условия формирования золоторудных месторождений Бодайбинского неопротерозойского прогиба / М.И. Кузьмин, В.В. Ярмолук, А.И. Спиридонов, В.К. Немеров, А.И. Иванов, Г.Л. Митрофанов // *Доклады РАН*. – 2006. – Т. 407. – № 6. – С. 793–797.
22. Этапы формирования крупномасштабной благороднометалльной минерализации месторождения Сухой Лог (Восточная Сибирь): результаты изотопно-геохронологического изучения / Н.П. Лаверов, И.В. Чернышов, А.В. Чугаев, Э.Д. Баирова, Ю.В. Гольцман, В.В. Дистлер, М.А. Юдовская // *Доклады РАН*. – 2007. – Т. 415. – № 2. – С. 236–241.
23. Петролого-геохимические черты околорудного метасоматизма в золоторудном месторождении Сухой Лог (Ленский район). Ч. 2. Петрология околорудного метасоматизма / И.В. Кучеренко, Р.Ю. Гаврилов, В.Г. Мартыненко, А.В. Верхозин // *Известия Томского политехнического университета*. – 2012а. – Т. 320. – № 1. – С. 28–37.
24. Петролого-геохимические черты околорудного метасоматизма в Вернинском золоторудном месторождении (Ленский район) /

- И.В. Кучеренко, Р.Ю. Гаврилов, В.Г. Мартыненко, А.В. Верхоzin // Известия Томского политехнического университета. – 2012б. – Т. 321. – № 1. – С. 22–33.
25. Cherkasova T., Kucherenko I., Abramova R. Rear polymineral zone of near-veined metasomatic aureole in mesothermal Zun-Holba gold deposit (Eastern Sayan) // IOP Conference Series: Earth and Environmental Science. – 2015. – V. 27. URL: <http://iopscience.iop.org/article/10.1088/1755-1315/27/1/012003/pdf>. (дата обращения: 10.03.2016).
26. Kucherenko I., Zhang Yuxuan, Abramova R. Mineral-petrochemical wallrock alteration of rocks in Bericul gold-ore deposit (Kuznetsk Alatau) // IOP Conference Series: Earth and Environmental Science. – 2015. – V. 27. URL: <http://iopscience.iop.org/article/10.1088/1755-1315/27/1/012006/pdf> (дата обращения: 10.03.2016).
27. Зарайский Г.П. Зональность и условия образования метасоматических пород. – М.: Наука, 1989. – 349 с.
28. Кучеренко И.В. Гидродинамика трещинно-поровых флюидно-породных взаимодействий и механизм массопереноса в процессах околотрещинного гидротермального метасоматизма // Разведка и охрана недр. – 2010. – № 11. – С. 37–43.
29. Кучеренко И.В. О фосфор-магний-титановой специализации золотоносных березитов // Доклады АН СССР. – 1987. – Т. 293. – № 2. – С. 443–447.

Поступила 15.02.2016 г.

Информация об авторах

Кучеренко И.В., доктор геолого-минералогических наук, профессор кафедры геологии и разведки полезных ископаемых Института природных ресурсов Национального исследовательского Томского политехнического университета.

UDC 553.411.071.242.4+550.4

PETROLOGIC AND GEOCHEMIC FEATURES OF THE ORE-CONTAINING SUBSTRATUM IN HYDROTHERMAL GOLD DEPOSITS. PART 1. PETROLOGY OF THE NEAR-ORE METASOMATISM

Igor V. Kucherenko,

kivr@tpu.ru

National Research Tomsk Polytechnic University,
30, Lenin Avenue, Tomsk, 634050, Russia.

The relevance of the research is caused by the necessity to correct and elaborate on geological (metallogenical) component of the hydrothermal gold deposits formation theory within the framework of which the conflicting ideas about ore-formation geological making (energy and metalliferous fluids sources) go in four competing hypotheses eliminating one other. Therefore it is impossible to develop a complex of effective forecast-search mineralization criteria.

The main aim of the study is to prove the belonging epigenetic mineral associations at the ore-formation stage in near-ore altering black shales series to metasomatic formations, contrary to the wide-spread ideas, and, as consequence, material-genetic similarity of apobackshales zoning metasomatic columns (haloes) with those, formed in non-shale (crystalline) substratum; external (non-rock) sources of gold and other metals, concentrated in deposits formed in black shales series.

The methods used in the study: 1) formation of geological cross sections of near-ore metasomatic haloes (columns) with selection of multipurpose samples (mass 1,5–2,0 kg); 2) preparation of samples for analysis in licensing laboratories; 3) diagnosis up to a species of minerals chemical compositions using optical and electron microscopes; 4) complete chemical silicate analysis of rocks samples; 5) atom-absorption (sensitivity $1 \cdot 10^{-8}$ wt. % for gold, silver, $5 \cdot 10^{-7}$ wt. % for mercury), controlling neutron-stimulate, chemical-spectrum analysis for gold (sensitivity $1 \cdot 10^{-8}$ and $3 \cdot 10^{-8}$ wt. % accordingly); 6) petrochemical conversions of the results of complete chemical silicate rock analysis in volume-atomic method; 7) balance calculations of petrogenic chemical elements migration in near-ore metasomatic columns; 8) calculations of statistical parameters of metal distribution and balance in near-ore expanse of deposits using two-level system of selections, to ensure reconstruction of chemical elements geological history and proper appraisal of donor potential of the rocks including black shales.

The results. In sixteen gold-ore deposits of south mountain-folded frame of Siberian craton two-, three-stage history of formation of non-shale and black-shale ore-bearing substratum was reconstructed and common petrologic-geochemical model of near-ore zone metasomatic haloes (columns) was developed. The haloes represent a combination of beresitic and propylitic formations in inside, intermediate chloritic and frontal zones accordingly. Polymetal composition of rear (beresite) zone, different from two-component (quartz, sericite) composition of the theoretical model (D.S. Korzhinsky), is formed in rock–fluid system, opened to carry out (Na, Si) and addition of components coming with metalliferous fluids from outside and fixed into own mineral new-formations and as trace elements mainly in inside zones. According to balance calculations potassium (sericite), reduced sulphur (sulphides), oxidized (carbonates) and reduced (kerogen, hydrocarbons) carbon, oregonous (Au, Ag, As, Hg and other) and petrogenous elements including femic Ti, P, Mg, Fe, Ca, Mn come into haloes and ores. The contrast of anomalies reaches many hundreds and thousands per cents. Ti and P form their own mineral phases – rutile, leucoxene, apatite, Mg, Fe, Ca Mn form a part of carbonates, other metals are concentrated in proper minerals and admixtures. Distribution of gold and accompanying metals in near-ore space is subject to metasomatic zoning – near-ore geochemical haloes always take up lesser volumes comparatively with the near-ore metasomatic ones. It is expressed in subclark contents (0,5–1,2 mg/t) and low distribution dispersion of gold, silver, mercury in various rocks, including black shales regionally metamorphosed on muscovite-biotite paragenesis level outside and in weak alteration subzone of frontal zone of near-ore metasomatic haloes, and in sequential increase of these parameters, as well as Au-Ag-relation and correlative connections between gold and silver from one mineral-petrochemical zone to another at intensification of near-ore metasomatic rocks alterations with achievement of maximum quantities in rear zone the more the higher metal contents in ores. The results obtained prove the material-genetic similarity of derivatives of ore-formation processes in non-shale and black-shale substratum and sinore origin of contrasting geochemical anomalies (their beyond-clark contents) in near-ore mesothermal gold deposits space. The first part of the paper introduces the results of study of near-ore metasomatic haloes (columns). The second part introduces the results of the study of oregonous (Au, Ag, Hg) elements distribution in near-ore space, the petrologic-geochemical materials are discussed and the conclusions are stated.

Key words:

Hydrothermal gold deposits, crystalline (non-shale) substratum, black shales, near-ore (ore-containing) zoned metasomatic, geochemical haloes.

REFERENCES

1. Mustard R., Ulrich T., Kamenetsky V.S., Mernagh T. Gold and metals enrichment in natural granitic melts during fractional crystallization. *Geology*, 2006, vol. 34, no. 2, pp. 82–88.
2. Gusev A.I. *Petrologiya zolotogeneriruyushchego magmatizma* [Petrology of the gold-generating magmatism]. Moscow, RAE Press, 2012. 160 p.
3. Martinez-Abad, Sepedal A., Arias D., Martin-Isard A. The Vilalba gold district, a new discovery in the Variscan terranes of the NW Spain: a geologic, fluid inclusions and stable isotope study. *Ore Geology Reviews*, 2015, vol. 66, pp. 344–365.
4. Anh Tuan Tran, Gaskov I.V., Hoa Trong Tran, Borisenko A.S., Izokh A.E., Dung Pham Thi, Li Hoang Yu, Nai Nguyen Thi. Ta Nang gold deposit in the black shales of Central Vietnam. *Russian Geology and Geophysics*, 2015, vol. 56, no. 10, pp. 1414–1427.
5. Rusinov V.L., Rusinova O.V., Borisovskiy S.E., Alysheva E.I. Metasomatic minerals composition of Sukhoi Log gold-ore deposit as a criterion of its genetic relation to basite-ultrabasic magmatism. *Doklady RAN*, 2006, vol. 405, no. 5, pp. 661–665. In Rus.
6. Komarov P.V., Tomson I.N. On plums and their influence on formation of precious metals mineralization in carbon-containing rocks. *Doklady RAN*, 2007, vol. 415, no. 6, pp. 779–781. In Rus.

7. Sarangi S., Sarkar A., Srinivasan R., Patel S.C. Carbon isotope studies of auriferous quartz carbonate veins from two orogenic gold deposits from the Neoproterozoic Chitradurga schist belt, Dharwar craton, India: Evidence for mantle magmatic source of auriferous fluid. *J. Asian Earth Sci.*, 2012, vol. 52, pp. 1–11.
8. Kucherenko I.V., Gavrilov R.Yu. Femophilic elements in wall-rock metasomatites and in ores of mesothermal gold deposits – newsletter of mantle deep. *International Journal of applied and fundamental research*, 2011, no. 1, pp. 37–43.
9. Kucherenko I.V., Zhang Yuxuan. Metallogenic problems of hydrothermal gold deposit formation: facts and arguments. *IOP Conf. Series: Earth and Environmental Science*, 2015, vol. 24. Available at: http://iopscience.iop.org/1755-1315/24/1/012024/pdf/1755-1315_24_1_012024.pdf (дата обращения: 10.02.2016).
10. Buryak V.A., Khmelevskaya N.M. *Suhoy Log – odno iz krupnyshikh zolotorudnykh mestorozhdeniy mira* [Sukhoi Log is one of the largest gold-ore deposits of the world]. Vladivostok, Dalnauka Publ., 1997. 156 p.
11. Goldberg J.S., Abramson G., Los V.L. Depletion and enrichment of exploration for mineral deposits. *Geochemistry Exploration, Environment Analysis*, 2003, vol. 3, pp. 281–293.
12. Shao Jun, Hui De-feng, Kong Xiang-min, Shou Nai-wu. Metallogeny of gold deposits of China. *Geology and Resources*, 2004, vol. 13, no. 4, pp. 246–250.
13. Large R.R., Maslennikov V.V., Francois R., Danyushevsky L.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, vol. 102, no. 7, pp. 1233–1267.
14. Meffre S., Large R.R., Scott R., Woodhead J., Chang Z., Gilbert S.E., Danyushevsky L.V., Maslennikov V., Hergt J.M. Age and pyrite-Pb-isotopic composition of the giant Sukhoi Log Sediment-hosted gold deposit, Russia. *Geochim. et Cosmochim. Acta.*, 2008, vol. 72, pp. 2377–2391.
15. Kryazhev S.G., Ustinov V.I., Grinenko V.A. Osobennosti flyuidnogo rezhima formirovaniya zolotorudnogo mestorozhdeniya Suhoy Log po izotopno-geokhimicheskim dannym [The features of fluid regime at formation of gold deposit Sukhoi Log by isotopic-geochemical data]. *Geokhimiya*, 2009, no. 10, pp. 1108–1117.
16. Chernyshov I.V., Chugaev A.V., Safonov Yu.G., Saroyan M.R., Yudovskaya M.A., Eremina A.V. Izotopny sostav svintsa po dannym vysokotochnogo ICP MS metoda i istochniki veshchestva krupnomasshtabnogo blagorodnometalnogo mestorozhdeniya Suhoy Log (Rossiya) [Lead isotopic composition by the data of high-precision ICP MS method and substance sources of large-scale precious-metal deposit Sukhoi Log (Russia)]. *Geologiya rudnykh mestorozhdeniy*, 2009, vol. 51, no. 6, pp. 550–559.
17. Yudovskaya M.A., Distler V.V., Rodionov N.V., Mokhov A.V., Antonov A.V., Sergeev S.A. Correlation of metamorphism and ore-formation in Sukhoi Log gold black-shale deposit by the data of U-Th-Pb-isotope SHRIMP-dating of accessory minerals. *Geology of ore deposits*, 2011, vol. 53, no. 1, pp. 32–64. In Rus.
18. Khanchuk A.I., Plyusnina L.P., Nikitenko E.M., Kurmina T.B., Barinov N.N. The Noble Metal Distribution in the Black Shales of the Degdekan Gold Deposit in Northeast Russia. *Russia Journal of Pacific Geology*, 2011, vol. 5, no. 2, pp. 89–96.
19. Jianping Wang, Jiajun Liu, Runmin Peno, Zhenjiang Liu, Baisheng Zhao, Zan Li, Yufeng Wang, Chonghao Lui. Gold mineralization in Proterozoic black shales: Example from the Haoyao-erhudong gold deposit, northern margin of the North China Craton. *Ore geology Reviews*, 2014, vol. 63, pp. 150–159.
20. Steadman J.A., Large R.R., Meffre S., Olin P.H., Danyushevsky L.V., Gregory D.D., Belousov I., Lounejeva E., Ireland T.R., Holden P. Synsedimentary to Early Diagenetic Gold in Black Shale-Hosted Pyrite Nodules at the Golden Mile Deposit, Kalgoorlie, Western Australia. *Economic Geology*, 2015, vol. 110, no. 5, pp. 1157–1191.
21. Kuzmin M.I., Yarmolyuk V.V., Spiridonov A.I., Nemerov V.K., Ivanov A.I., Mitrofanov G.L. Geodynamical conditions of gold deposits formation of Bodaibo Neoproterozoic depression. *Doklady RAN*, 2006, vol. 407, no. 6, pp. 793–797. In Rus.
22. Laverov N.P., Chernyshov I.V., Chugaev A.V., Bairova E.D., Goltsman Yu.V., Distler V.V., Yudovskaya M.A. Stages of formation of large-scale precious-metal mineralization of deposit Sukhoi Log (East Siberia): results of isotopic-geochronologic study. *Doklady RAN*, 2007, vol. 415, no. 2, pp. 236–241. In Rus.
23. Kucherenko I.V., Gavrilov R.Yu., Martynenko V.G., Verkhovzin A.V. Petrology-geochemical features of near-ore metasomatism in Sukhoi Log gold-ore deposit (Lensk region). P. 2. Petrology of near-ore metasomatism. *Bulletin of the Tomsk Polytechnic University*, 2012a, vol. 320, no. 1, pp. 28–37. In Rus.
24. Kucherenko I.V., Gavrilov R.Yu., Martynenko V.G., Verkhovzin A.V. Petrology-geochemical features of near-ore metasomatism in Verninsk gold-ore deposit (Lensk region). *Bulletin of the Tomsk Polytechnic University*, 2012b, vol. 321, no. 1, pp. 22–33. In Rus.
25. Cherkasova T., Kucherenko I., Abramova R. Rear polymetal zone of near-veined metasomatic aureole in mesothermal Zun-Holba gold deposit (Eastern Sayan). *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, 2015, vol. 27. Available at: <http://iopscience.iop.org/article/10.1088/1755-1315/27/1/012003/pdf>. (accessed: 10.03.2016).
26. Kucherenko I., Yuxuan Zhang, Abramova R. Mineral-petrochemical wallrock alteration of rocks in Bericul gold-ore deposit (Kuznetsk Alatau). *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, 2015, vol. 27. Available at: <http://iopscience.iop.org/article/10.1088/1755-1315/27/1/012006/pdf> (accessed: 10.03.2016).
27. Zaraysky G.P. *Zonalnost i usloviya obrazovaniya metasomaticheskikh porod* [Zoning and conditions of metasomatic rocks formation]. Moscow, Nauka Publ., 1989. 349 p.
28. Kucherenko I.V. Hydrodynamics of fracture-pore fluid-rock interactions and mechanism of mass transfer in near-fracture hydrothermal metasomatism processes. *Razvedka i okhrana nedr*, 2010, no. 11, pp. 37–43. In Rus.
29. Kucherenko I.V. O fosfor-magniy-titanovoy spetsializatsii zolotonosnykh berezotov [On phosphorus-magnesium-titanium specialization of auriferous beresites]. *Doklady AN SSSR*, 1987, vol. 293, no. 2, pp. 443–447.

Received: 15.02.2016.

Information about the authors

Igor V. Kucherenko, Dr. Sc., professor, National Research Tomsk Polytechnic University.