

УДК 553.242.4:167–047.58

ПРОБЛЕМЫ РУДНОЙ ГЕОЛОГИИ И ЧЕЛОВЕЧЕСКИЙ ФАКТОР. ЧАСТЬ 1. МИНЕРАЛОГО–ПЕТРОХИМИЧЕСКАЯ ЗОНАЛЬНОСТЬ ОКОЛОЖИЛЬНЫХ МЕТАСОМАТИЧЕСКИХ ОРЕОЛОВ В МЕЗОТЕРМАЛЬНЫХ МЕСТОРОЖДЕНИЯХ ЗОЛОТА: ТЕОРИЯ, ЭКСПЕРИМЕНТ, ПРИРОДА

Кучеренко Игорь Васильевич,

kivr@tpu.ru

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

Актуальность работы. В реконструкции процессов образования мезотермальных месторождений цветных металлов, золота, урана существуют проблемы, решения которых не найдены до сего времени в течение многих десятилетий, некоторых – более столетия. Очевидная необходимость корректных решений этих проблем для углубления – развития – теории гидротермального рудообразования и совершенствования комплексов прогнозно-поисковых критериев оруденения стимулирует поиск и устранение объективных и, возможно, субъективных причин, обуславливающих бесконечные дискуссии, ранее оправданных дефицитом достоверных данных, но ставших более понятными по мере накопления новых знаний.

Цель. Для реконструкций природных процессов и устранения оцениваемых автором как субъективные причин разногласий предложены и обсуждаются известные ранее и авторские решения следующих ключевых дискуссионных проблем рудной геологии: 1) проблемы формирования околорудной метасоматической зональности, в частности, в околожильном (околоразломном) ее варианте; 2) проблемы источников золота, сосредоточенного в рудах среди кристаллического субстрата и черных сланцев; 3) проблемы обусловленности образования мезотермальных месторождений золота магматизмом; 4) проблемы формационной типизации месторождений твердых полезных ископаемых как средства реализации объективно приоритетного в сочетании с дедуктивным индуктивным способом познания процессов рудообразования.

Методы исследования. Для решения каждой проблемы: 1) выполнен анализ фактологической базы существующих представлений на предмет оценки их корректности и соответствия современным данным; 2) приведены и обсуждаются авторские материалы, предлагаемые для обоснования альтернативных существующим, как представляется, корректных решений проблем.

Результаты. В рамках решения первой проблемы посредством анализа результатов минералого-петрохимического изучения зональных колонок березитовой метасоматической формации, образованных в плутонических и вулканических основного, среднего, кислого составов, метаморфических разных фаций, осадочных, включая черные сланцы, породах в девятнадцати золоторудных мезотермальных месторождениях южного горно-складчатого обрамления Сибирского кратона показано несоответствие следующей из теории метасоматической зональности Д.С. Коржинского теоретической модели природным метасоматическим колонкам – не достигается предписанная теорией «мономинеральность» тыловой зоны. Последняя, как и в экспериментальных колонках, «полиминеральна», а число новообразованных минералов в ней, включая рудные, сопоставимо с числом минералов в исходных породах или превосходит его. «Полиминеральность» тыловых зон обусловлена доказанной балансовыми расчетами межзональной миграции петрогенных компонентов встречной из трещинного раствора в поровый боковых пород и из порового раствора в трещинный диффузией компонентов, а также пульсационным (порционным) режимом поступления различающихся в последовательных порциях по термодинамическим, физико-химическим параметрам, составам, концентрациям растворенных веществ металлоносных флюидов в области породо-рудообразования. В теории метасоматической зональности, опирающейся на явление дифференциальной подвижности компонентов в изменяющихся термодинамических, физико-химических условиях и законы термодинамики, не учтены упомянутые известные в годы разработки теории природные факторы, определяющие формирование зональности околоразломных метасоматических колонок, вероятно, в большей степени в сравнении с использованными в существующей теории. Негативное влияние человеческого фактора на результаты исследования проблемы выражается также в необъясненном исключении из оценки жизнеспособности теории обязательной процедуры соотношения теоретической модели метасоматической зональности с созданной природой, в результате которого необходимость коррекции теории в околожильном (околоразломном) варианте с целью трансформации ее в жизнеспособную стала бы очевидной.

Ключевые слова:

Мезотермальные месторождения золота, теоретическая, экспериментальная, природная модели околожильных метасоматических колонок пропилит-березитового минералого-петрохимического профиля, природные факторы, определяющие минералого-петрохимическую зональность околожильных метасоматических колонок, человеческий фактор и его негативное влияние на решение проблемы.

1. Постановка задачи

Объективно обусловленный индуктивный способ познания геологических процессов предполагает, как известно, реконструкцию содержания и последовательности их функционирования посредством изучения оставленных ими вещественных «следов» – ассоциаций минералов, горных пород, структур с последующей интерпретацией условий их образования. Элементы дедуктивного способа познания – теоретические разработки, мо-

делирование, эксперимент – сохраняют в этом случае преимущественно вспомогательное значение, поскольку невозможно понять, как действует природа, создавая, скажем, месторождения полезных ископаемых, как «работают» законы химии, физики, механики, термодинамики без предварительного изучения устройства месторождений, минеральных, химических составов пород и руд, их соотношений и эволюции в пространстве и времени, а также без других данных, которые могли бы

быть использованы для познания процессов рудообразования.

В рудной геологии существуют проблемы, решавшиеся в течение многих десятилетий, но не решенные до сих пор, обсуждаемые или пребывающие в забвении. В приложении к мезотермальным месторождениям золота и других металлов к их числу, в частности, относятся:

- проблема формирования околорудной метасоматической зональности, в том числе, в около-разломном (околожилном) ее варианте;
- проблема источников золота и других сопровождающих его металлов, сосредоточенных в рудах гидротермальных месторождений, образованных среди кристаллического субстрата и черных сланцев;
- проблема связей (обусловленности образования) мезотермальных месторождений золота и других металлов с магматизмом, сопряженная с предыдущей проблемой и проблемой обусловленности рудообразования региональным метаморфизмом;
- проблема формационной типизации месторождений твердых полезных ископаемых многоцелевого назначения, пребывающая в забвении, но сохранившая актуальность после длительных попыток ее решения в шестидесятых–восьмидесятых годах прошлого столетия.

Тот факт, что перечисленные проблемы, имеющие очевидное теоретическое и прикладное прогностно-поисковое значение, изучаются и обсуждаются в отечественной и зарубежной литературе столь длительное время – столетие, без признаков скорого их решения, имеет свою объективную и субъективную причины.

Первая заключается в том, что накопление новых данных, способствующих решению проблем, их конвертация в новое знание и тем самым углубление (развитие) теории рудообразования сопряжены с объективными обстоятельствами – дефицитом фактов, обусловленным не всегда преодолимыми (преодоленными) трудностями или реальными возможностями их сбора, не всегда возможными корректными способами их интерпретации и другими.

Вторая причина, квалифицированная как «человеческий фактор», оказывает негативное, как правило, сильное влияние на процесс познания в обсуждаемой области, способное затормозить и даже «заморозить» на какое-то время развитие теории.

Человеческий фактор заключается в том, что в исследовательской практике, ориентированной на решение, в частности, перечисленных проблем, индуктивный подход, опирающийся на приоритет эмпирических (наблюдаемых в природе) данных над теоретическими построениями, заменяется приемами дедуктивного подхода – идеи, не согласованные с эмпирическими данными или даже «оторванные» от них, трансформированные в рабочие гипотезы, подвергаются теоретической раз-

работке, как правило, экспериментальной проверке. Однажды принятая или заменившая предшествующую кажущаяся рациональной предложенная авторитетом руководящая идея представляется единственно верной большей части занятого решением обсуждаемых проблем ученого сообщества и определяет, нередко без надлежащего разностороннего анализа и обсуждения других возможных путей их решения, методологию и методы дальнейших исследований. Вероятно, вследствие этого реализация руководящей идеи на практике излишне часто по прошествии времени заводит решение соответствующей ей проблемы в тупик. Это происходит в тех случаях, когда по объективным или субъективным причинам в принятии решения не учтены влияющие на него факты – неизвестные и даже ставшие известными, накопившиеся в процессе исследования, но не укладываемые в «приоритетную» руководящую идею, кажущиеся не заслуживающими содержательного обсуждения, тем более учета и использования. При этом обязательная оценка соответствия результатов – научных положений, выводов реальной природной ситуации как критерий их достоверности – жизнеспособности, иногда остается за рамками исследования. Пренебрежение этой прописной истиной влечет за собой как неизбежное следствие конкурирующие гипотезы, но мало достоверного знания.

В цикле статей под общим обозначенным названием приведены и анализируются материалы, иллюстрирующие негативное влияние человеческого фактора на углубление теории гидротермального рудообразования в составе и содержании некоторых перечисленных ключевых проблем, предлагаются и обсуждаются способы снижения его влияния и/или нейтрализации.

2. Модели околоразломной (околожилной) минералого-петрохимической зональности метасоматических колонок

Совокупность геологических ситуаций образования эндогенных метасоматических пород включает эндо-экзоконтактовые области остывающих интрузий (контактовый метасоматизм, сопровождаемый образованием рудоносных известковых, магнезиальных, силикатных скарнов), разогретые поступающими извне горячими растворами приконтактовые области химически разнородных пород (контактово-реакционный метасоматизм), горные породы в обрамлении разломов, в том числе выполняемых рудоносными кварцевыми жилами (околожилный метасоматизм). В последнем случае в кварцевых жилах и минерализованных зонах локализованы руды Sn, W, Mo, Ta, Nb, Be, Li, Rb, Cs, U в сопровождении метасоматитов грейзеновой формации, Au, Ag, U, Pb, Zn (Cu), Sb в сопровождении ореолов березитовой формации, Hg, Sb, Au, Ag, Sn, Mo, U в сопровождении метасоматитов аргиллизитовой формации.

Во всех случаях метасоматические ореолы – колонки – обладают минералого-петрохимической зональностью, условия формирования которой регламентируются гидродинамическими, термодинамическими, физико-химическими режимами в системах горная порода – горячий раствор, свойствами, концентрациями (химическими потенциалами) участвующих в реакциях компонентов – условиями, которые обобщены в разработанной Д.С. Коржинским единственной теории метасоматической зональности [1, 2].

В основу теории заложено известное явление дифференциальной подвижности химических элементов – их способности в конкретных условиях среды находиться в растворенном или инертном в составе минералов состоянии, в зависимости от эволюции условий среды быть более или менее подвижными, более или менее инертными. Совокупность основных минералообразующих компонентов разделена Д.С. Коржинским [1] на четыре группы: наиболее подвижных (H_2O , CO_2), подвижность которых возрастает с увеличением соответственно температуры или давления; весьма подвижных при всех условиях (S, Cl, Na, K), подвижных при определенных условиях (O_2 , Si, Mg, Ca, Fe), инертных при всех условиях (Al, P, Ti).

2.1. Теоретическая модель околожильной метасоматической колонки березитового минералого-петрохимического профиля

В околоразломном варианте метасоматический процесс в образующихся мезотермальных месторождениях перечисленных металлов инициируется поступлением в разломы, трещины горячих флюидов и созданием породно-флюидной системы, в которой застойный поровый раствор сочетается, согласно теории, с фильтрующимся по разломам, трещинам раствором.

Застойный режим поровых растворов доказывался участием в околоразломных метасоматитах новообразованных минералов переменного, изменяющегося вдоль и вкrest простирания каждой минеральной зоны метасоматических колонок, состава вследствие непрерывного изменения свойственного диффузионным колонкам, в отличие от фильтрационных колонок, в всем их протяжении химического потенциала каждого компонента [2]. Доказывающий застойный режим поровых растворов боковых пород концентрационно-диффузионный механизм массопереноса в процессе околоразломного метасоматизма выражен также в межзональной и внутризональной миграции петрогенных компонентов в объемах формирующихся колонок из областей более высоких их концентраций в области более низких в направлении выравнивания концентраций [3].

Вместе с тем декларируемая в теории фильтрация трещинных растворов по разломам при застойном режиме поровых опровергается многочисленными фактами пространственно-временной сопряженности рудных столбов в кварцевых жи-

лах осевой зоны метасоматических колонок и контрастных аномалий металлов в боковых породах смежной тыловой (березитовой) зоны при незначительно повышенных (субкларковых) содержаниях металлов в породах напротив безрудных участков жил [3].

Согласно теории метасоматической зональности, в условиях непрерывного поступления горячих растворов от начала до завершения процессов при диффузионном метасоматизме в обрамлении разломов образуется зональная метасоматическая колонка, которая включает резко отграниченные одновременно образованные минеральные зоны с уменьшением в каждой более тыловой зоне числа минералов на единицу, сопровождаемом переходом по одному компоненту из инертного в подвижное состояние вплоть до тыловой мономинеральной зоны или зоны полного растворения. Переходящие в подвижное состояние компоненты удаляются из системы. На границах минеральных зон – фронтах замещения – полностью замещается только один минерал, так как скорость продвижения фронтов замещения разных минералов различна. Возникшие минеральные зоны в процессе метасоматизма постоянно разрастаются с замещением внешних зон внутренними, то есть посредством надрывания более тыловых зон на более фронтальные.

В случаях пересыщенности трещинного раствора поступившими с ним компонентами в боковых породах могут возникнуть фронты замещения, по обе стороны которых, то есть в смежных минеральных зонах, число минералов не изменяется или возрастает. Это происходит вследствие диффузии компонентов из трещинного раствора в поровый посредством заполнения пустот – одновременного образования всех минералов, содержащих пересыщающие трещинный раствор компоненты. Взаимодействие с минералами пород компонентов раствора может сопровождаться увеличением числа реакционных минералов. Однако заполняющие пустоты и реакционные новообразованные минералы при дальнейшем взаимодействии с компонентами раствора замещаются, растворяются, их число уменьшается «вплоть до мономинеральности» тыловой (осевой) зоны – кварцевой жилы.

Таким образом, ключевое следствие – вывод – из термодинамической теории метасоматической зональности Д.С. Коржинского заключается в том, что в процессе околоразломного метасоматизма система «порода – трещинный – поровый горячие растворы» открыта преимущественно в сторону выноса слагающего породы вещества, в итоге кроме одного, в кислотных метасоматитах – кремнезема, не растворимого в кислотных растворах.

На примере березитовой метасоматической колонки, в которой березит занимает некое промежуточное положение, вывод иллюстрируется следующей сменой минеральных зон [1]: минеральная зона березита, сложенного типовым для него агрегатом кварца, серицита, анкерита, пирита, рутила,

сменяется смежными более тыловыми зонами, в которых исчезают сначала анкерит, а затем пирит, или сначала пирит, а затем анкерит. Смежная с осевой, согласно теории, – мономинеральной кварцевой жилой тыловая зона сложена кварцем, серицитом с примесью рутила. В ней, в отличие от более фронтальных зон, «почти не сохраняются» [1. С. 446] реликтовые минералы исходного гранит-порфира, но образуется рутил – минерал титана, инертного «при всех условиях».

2.2. Экспериментальная модель околоразломной минералого-петрохимической зональности метасоматической колонки березитового профиля

Корректным доказательством жизнеспособности теории природного процесса, как известно, служит соответствие (адекватность) следующей из теории его модели созданному природой объекту или природному явлению. Представляют интерес также результаты экспериментов, к интерпретации которых, однако, приходится относиться с осторожностью вследствие объективно обусловленной невозможности моделировать, в частности, геологическое время – один из факторов, влияющих на ход и результаты химических реакций.

В экспериментах, ориентированных на получение метасоматической колонки березитового минералого-петрохимического профиля, воспроизводящих диффузионный механизм массопереноса, создавались условия, реконструированные при изучении природных метасоматических колонок, имитирующие околоразломный средне-низкотемпературный при постоянном давлении 1000 бар кислотный метасоматизм. Цель экспериментов – оценить влияние температуры, кислотности, концентрации K в растворе на стабильность березитовых парагенезисов в составе кварц + серицит + анкерит ± пирит ± хлорит ± альбит ± калиевый полевой шпат.

В качестве исходной породы в опытах использовался гранодиорит или кварцевый диорит, измельченный до фракции менее 0,07 мм. Проба запрессовывалась в золотую или платиновую пробирку диаметром 5 мм, длиной 50 мм [4]. Пробирка помещалась в автоклав с тем, чтобы воздействующий раствор свободно контактировал с породой со стороны открытого конца пробирки. В раствор добавлялся KCl до достижения концентрации 0,1 или 1,0 М, кислотность раствора регулировалась добавлением HCl или элементарной S от 0,001 до 0,1 М, дополнительно вводилась углекислота ($X_{CO_2}=0,1$) и до насыщения раствора – аморфный кремнезем в виде порошка. Объем раствора превышал объем породы в 100 раз.

Опыты выполнялись в течение 2 недель, некоторые длились до 4 месяцев. Полученные в результате зональные метасоматические колонки изучались оптическими и рентгеновскими методами, химические составы минералов определялись на рентгеновском микроанализаторе «Camebax».

В результате ранних экспериментов [4] получены зональные метасоматические колонки двух типов (табл. 1), различающиеся лишь деталями. Детали заключаются в образовании в одной из промежуточных минеральных зон калиевого полевого шпата в случае повышенных значений в системе отношения K^+/H^+ и в замене в тыловой зоне пирита хлоритом при отсутствии в системе серы. Отмечается и другая особенность экспериментальных колонок – участие в составе промежуточных зон анкерита, в том числе в ассоциации кварц + серицит + анкерит, отсутствующего в тыловых зонах. В прифронтальных зонах, граничащих с исходной породой, анкерит постепенно сменяется кальцитом. В относительно низкотемпературных (менее 250 °C) условиях в промежуточных зонах вместо анкерита кристаллизовался карбонат брейнеритового ряда.

Таблица 1. Порядок минеральной зональности экспериментальной диффузионной метасоматической колонки [4]

Table 1. Order of mineral zoning of the experimental diffusional metasomatic column [4]

| Тип а/Type a | | | | | | |
|---------------------|-----|-----|-----|-----|-----|------------------------------------|
| Кв | Кв | Кв | Кв | Кв | Кв | Кв |
| Сер | Сер | Сер | Сер | Сер | Пл | Пл |
| | | | Пл | Пл | Амф | Би |
| Пир | Пир | Анк | Анк | Анк | Би | Амф |
| | | | | Ка | Ка | |
| | | | Хл | Хл | Хл | Хл |
| Раствор Solution | | | | | | Исходная порода Initial rock |
| Тип б/Type b | | | | | | |
| Кв | Кв | Кв | Кв | Кв | Кв | Кв |
| Сер | Сер | Сер | Пл | Пл | Пл | Пл |
| | | | Кпш | | Би | Би |
| Пир | Пир | Анк | Анк | Анк | Амф | Амф |
| | | | | Ка | Ка | |
| | | | Хл | Хл | Хл | Хл |

Примечание. Кв – кварц, Пл – плагиоклаз, Би – биотит, Амф – амфибол, Хл – хлорит, Ка – кальцит, Анк – анкерит, Кпш – калиевый полевой шпат, Сер – серицит, Пир – пирит.

Note. Кв – quartz, Пл – plagioclase, Би – biotite, Амф – amphibole, Хл – chlorite, Ка – calcite, Анк – ankerite, Кпш – orthoclase, Сер – sericite, Пир – pyrite.

Согласно сформулированному в результате ранних экспериментов выводу, в заданных условиях (1000 бар, $X_{CO_2}=0,1$) поле стабильности березитов со стороны высоких температур ограничено значением 340 °C, а при более низких температурах, отвечающих нижнему пределу гомогенного состояния флюидов в данных условиях, – 240 °C, при этом стабильность парагенезисов березитов сохраняется в интервале $lg(K^+/H^+)=2,9...5,6$. При наиболее вероятной в природных растворах концентрации K в диапазоне 0,01...1,0 М величина рН в обсуждаемых условиях, приемлемая для образования березитов, составляет 1,7...4,9 при $T=310$ °C

и 2,9...7,6 при $T=240^{\circ}\text{C}$. Авторы экспериментов [4] предполагают образование березитов в породно-флюидных системах при $P<1000$ бар и X_{CO_2} не $>0,1$, в этом случае – при $T<340^{\circ}\text{C}$.

Образованная в описанных условиях ранних экспериментов, но в отсутствие серы, метасоматическая колонка включает минеральные зоны [5], перечисленные в табл. 2.

Таблица 2. Порядок минеральной зональности экспериментальной диффузионной метасоматической колонки в гранодиорите [5]

Table 2. Order of mineral zoning of the experimental diffusional metasomatic column in granodiorite [5]

| Минеральные зоны Mineral zones | Минеральный состав Mineral composition |
|--|---|
| Фронтальная (гранодиорит) Frontal (granodiorite) | кварц, хлорит, калиевый полевой шпат, <u>плаггиоклаз</u> , <u>биотит</u> , <u>амфибол</u> quartz, chlorite, feldspar, <u>plagioclase</u> , <u>biotite</u> , <u>amphibole</u> |
| 1 ^я промежуточная 1 intermediate | кварц, серицит, хлорит, анкерит, <u>калиевый полевой шпат</u> quartz, sericite, chlorite, ankerite, <u>feldspar</u> |
| 2 ^я промежуточная 2 intermediate | кварц, серицит, хлорит, <u>анкерит</u> quartz, sericite, chlorite, <u>ankerite</u> |
| Тыловая Rear | кварц, серицит, хлорит quartz, sericite, chlorite |

Примечание. 1) Условия эксперимента: углекислотный раствор без серы, $P=1$ кбар, $X_{\text{CO}_2}=0,1$, $KCl=1,0$ М, избыток SiO_2 . 2) Здесь и далее подчеркнуты минералы, исчезающие в более тыловых зонах

Note. 1) The conditions of the experiment: coal acid solution without sulphur, $P=1$ kbar, $X_{\text{CO}_2}=0,1$, $KCl=1,0$ M, surplus of SiO_2 . 2) The minerals disappearing in more rear zones are underlined

Авторы экспериментов считают, что парагенезис кварц + серицит + хлорит отвечает обширной совокупности метасоматитов кварц-серицитового состава, но присутствие в числе новообразований в промежуточных зонах анкерита или образованного при температуре ниже 300°C брейнерита сближает метасоматит с березитом в специфическом составе кварц + серицит + хлорит, в котором при отсутствии серы, как отмечалось, вместо пирита образован хлорит. Данную породу, вероятно, следует считать фациальной разновидностью березита.

В более поздних экспериментах в качестве исходной породы использовался дробленый кварцевый диорит, запрессованный в титановый вкладыш объемом 150 см^3 , который, в свою очередь, помещался в автоклав, заполненный смесью H_2O и CO_2 [6]. Углекислоту ($X_{\text{CO}_2}=0,01...0,2$) в систему вводили в виде твердого сухого льда и в составе щавелевой кислоты, которая разлагалась при нагревании с выделением CO_2 . Кислотность раствора регулировалась добавлением KCl в концентрации от 10^{-2} до $3,0$ М. Серу (порошок) вводили в элементарном виде с достижением концентрации $10^{-3}...0,6$ моль/кг H_2O . Раствор насыщался кремнеземом в составе измельченного кварца и аморфной массы. Опыты выполнялись при $T=500...200^{\circ}\text{C}$, $P=0,5...3$ кбар в течение 2 недель. Определялись не только химические составы минералов, но и горных пород, слагающих минеральные зоны.

Все полученные колонки зональны и характеризуются уменьшением числа минералов в направлении к тыловой зоне, хотя его (уменьшение) следует рассматривать скорее как тенденцию. Одна из

Таблица 3. Порядок минералого-петрохимической зональности экспериментальной диффузионной метасоматической колонки березитового профиля [6]

Table 3. Order of mineral-petrochemical zoning of the experimental diffusional metasomatic column of the beresite type [6]

| Номера зон Numbers of zones | Мощность, мм Thickness, mm | Минеральный состав зон Mineral composition of zones | Содержание, мас. %/Content, wt. % | | | | | | | | | |
|--------------------------------|-------------------------------|--|-----------------------------------|-------------------------|----------------------|-----------------------|--------|-----|-----|-----|----------------|----------|
| | | | SiO_2 | Al_2O_3 | K_2O | Na_2O | S | CaO | MgO | FeO | TiO_2 | Σ |
| 0 | – | Кварцевый диорит/Quartz diorite | 47,2 | 14,4 | 0,9 | 2,9 | не ан. | 5,2 | 3,0 | 5,2 | 0,35 | 79,15 |
| 1 Фронтальная Frontal | 26,0 | Кварц + серицит + кальцит + хлорит + плаггиоклаз + (биотит) + амфибол Quartz + sericite + calcite + chlorite + plagioclase + (biotite) + amphibole | 48,5 | 14,3 | 1,3 | 2,6 | не ан. | 5,4 | 2,9 | 5,1 | 0,35 | 80,45 |
| 2 | 8,5 | Кварц + серицит + анкерит + хлорит + <u>кальцит</u> + (плаггиоклаз, биотит, <u>амфибол</u>) Quartz + sericite + ankerite + chlorite + <u>calcite</u> + (plagioclase, biotite, <u>amphibole</u>) | 48,1 | 15,0 | 1,5 | 2,5 | не ан. | 5,3 | 2,9 | 5,2 | 0,35 | 80,85 |
| 3 | 4,2 | Кварц + серицит + анкерит + пирит + <u>хлорит</u> + (плаггиоклаз, <u>биотит</u>) Quartz + sericite + ankerite + pyrite + <u>chlorite</u> + (plagioclase, <u>biotite</u>) | 46,5 | 14,0 | 2,0 | 2,5 | 0,2 | 4,9 | 3,0 | 5,4 | 0,35 | 78,85 |
| 4 | 1,0 | Кварц + серицит + анкерит + пирит + (плаггиоклаз) Quartz + sericite + ankerite + pyrite + (plagioclase) | 47,6 | 14,4 | 3,0 | 2,4 | 1,5 | 5,3 | 2,6 | 5,3 | 0,35 | 82,45 |
| 5 Тыловая/Rear | 0,3 | Кварц + серицит + пирит + (анкерит) Quartz + sericite + pyrite + (ankerite) | 36,6 | 14,6 | 3,7 | 0,5 | 3,0 | 2,1 | 1,6 | 4,8 | 0,35 | 67,25 |

Примечание. В скобках приведены реликтовые минералы.

Note. Relict minerals are in round brackets.

типичных колонок образована при воздействии на породу кислого раствора с $pH=2,8$ (табл. 3).

В отличие от высокотемпературных метасоматитов, образованных в условиях кислотного выщелачивания, в минеральных зонах обсуждаемых колонок сохраняются реликтовые минералы исходной породы, а тыловая зона мощностью около 1 мм полиминеральна – сложена березитом в составе кварца, серицита, анкерита, пирита. Иногда формируются «дополнительные» (смежные) минеральные зоны [4, 5] без изменения числа минеральных фаз. Это происходит, как считают авторы экспериментов, в случаях высокой кислотности растворов, при которой анкерит частично, с сохранением лишь реликтов, растворяется. Как отмечают авторы экспериментов, изменение минеральных составов минеральных зон сопровождается слабо выраженной межзональной миграцией в сторону привноса – выноса компонентов – во фронтальной и промежуточных зонах содержания большинства компонентов сохраняются примерно на одном уровне с содержаниями их в исходной породе. Миграционная активность их повышается только в тыловой зоне, из которой частично удалены SiO_2 , Na_2O , CaO , MgO , FeO , но в которую дополнительно поступили K_2O , S и CO_2 . При этом остались максимально инертными Al_2O_3 и TiO_2 .

2.3. Природная модель околожильной минералого-петрохимической зональности метасоматической колонки пропилит-березитового профиля

Типовая модель околоразломной (околожильной) созданной природой метасоматической зональности (табл. 4) разработана на основе изучения автором структуры, минерального, химического составов околорудных метасоматических ореолов (колонок), образованных в золоторудных месторождениях Кодаыр, Восточном (Юго-Восточный Казахстан, поздний палеозой), Центральном, Бериккульском (Кузнецкий Алатау, ранний палеозой), Зун-Оспа, Зун-Холба (Восточный Саян, средний палеозой), Западном, Ирокиндинском, Кедровском, Петелинском, Богодиканском, Верхне-Сакуканском, Каралонском, Уряхском (Северное Забайкалье, поздний палеозой), Сухоложском, Вернинском, Медвежьем (Ленский район, средний палеозой), Чертово Корыто, (Патомское нагорье, поздний палеозой). Исходные горные породы, вмещающие золотосодержащие кварцевые жилы, минерализованные зоны, сопровождаемые метасоматическими ореолами, представлены кислыми, средними, основными плутоническими, вулканическими, метаморфическими разных фаций, осадочными, включая черные сланцы, породами [3, 7–9 и др.].

Занятые ореолами объемы земной коры определяются проницаемостью среды – в трещиноватых породах их ширина достигает многих сотен – первых тысяч метров, в массивных, например гранитоидах, нередко не превышает десятков метров. Во

всех случаях ширина минералого-петрохимических зон в колонках последовательно уменьшается от фронтальной наиболее объемной зоны к малообъемной тыловой, ширина которой в массивных породах нередко не превышает 1...5 см. В некоторых колонках тыловая зона отсутствует.

В черносланцевых толщах и в мощных зонах разломов обычное явление – чередование в поперечных разрезах ореолов минералого-петрохимических зон в разных сочетаниях, обусловленное, в свою очередь, чередованием тектонических швов с разной проницаемостью – в обрамлении более проницаемых швов происходит более интенсивное преобразование пород.

Границы между периферийными (фронтальной, хлоритовой) минералого-петрохимическими зонами фиксируются, как правило, резкие (нитевидные), между тыловыми – постепенные («размытые»); в последнем случае переходы между зонами происходят в интервале нескольких мм посредством снижения числа реликтов замещающего минерала в направлении тыловой зоны. В тыловых альбитовой и березитовой зонах строение пород приобретает универсальные черты – массивная текстура метасоматитов заменяет разнообразные текстуры, гранобластовая, гранолепидобластовая, порфириобластовая структуры заменяют разнообразные структуры исходных пород.

Большинство новообразованных минералов участвует в минеральном составе всех минералого-петрохимических зон. Исключение составляют актинолит и тремолит, хлорит и эпидот, альбит, которые замещаются на границах соответственно фронтальной и хлоритовой (эпидотовой), хлоритовой (эпидотовой) и альбитовой, альбитовой и тыловой зон. Замечено увеличение массы новообразованных минералов перед внутренней границей их исчезновения в каждой смежной более тыловой зоне. Возрастает общая масса минеральных новообразований в направлении к тыловой зоне с полным растворением в последней (кроме кварца, карбонатов, мусковита) всех минералов исходных пород.

Возрастание массы карбонатов в промежуточной хлоритовой (эпидотовой) и тыловых зонах сопровождается укрупнением их кристаллов – ромбоэдров до 5 мм в поперечнике и изменением их составов в сторону увеличения магнезиальности и железистости.

В одном из месторождений (Зун-Оспа) обнаружено отклонение от типовой модели метасоматической зональности, которое выражается в минеральном составе тыловой зоны апогранитных метасоматических колонок, обрамляющих золоторудные кварцевые жилы № 1, 5, 6. В составе метасоматита диагностированы кварц, серицит, рутил, лейкоксен, магнетит, пирит, Mg-Fe хлорит, но отсутствуют свойственные березиту Mg-Fe карбонаты, которые участвуют в составе метасоматитов более фронтальных зон, в том числе в смежной с тыловой зоной, сложенной кварцем, серицитом, рутилом, лейкоксеном, магнетитом, пиритом, хлори-

том, доломитом-анкеритом, магнезитом. Присутствие в тыловой зоне природных колонок хлорита сближает их с экспериментальными колонками [4, 5] (табл. 1, 2), полученными при дефиците или отсутствии в растворах серы (табл. 2), как следствие, в метасоматитах – сульфидов (пирита).

Таблица 4. Порядок минеральной зональности природной типовой диффузионной околожильной метасоматической колонки пропилит-березитового профиля

Table 4. Order of the mineral zoning of the natural standard-type diffusional near-vein metasomatic column of propilite-beresite type

| Минеральные зоны Mineral zones | Минеральный состав Mineral composition |
|---|--|
| Фронтальная Frontal | (пироксены ± амфиболы ± полевые шпаты ± биотит ± мусковит ± кварц) + серицит ± лейкоксен ± рутил ± магнетит ± пирит ± кальцит + альбит ± (кероген) ± хлориты ± цоизит ± актинолит ± тремолит (pyroxenes ± amphiboles ± feldspars ± biotite ± muscovite ± quartz) + sericite ± leucoxene ± rutile ± magnetite ± pyrite ± calcite + albite ± (kerogene) ± chlorites ± zoisite ± actinolite ± tremolite |
| Хлоритовая (эпидотовая, эпидот-хлоритовая) Chloritic (epidotic, epidote-chloritic) | (полевые шпаты ± кварц) ± кварц + серицит ± лейкоксен ± рутил ± магнетит + пирит ± кальцит ± доломит ± (кероген) + альбит ± хлориты ± цоизит ± клиноцоизит ± эпидот ± сульфиды ± золото ± серебро (feldspars ± quartz) ± quartz + sericite ± leucoxene ± rutile ± magnetite + pyrite ± calcite ± dolomite ± (kerogene) + albite ± chlorites ± zoisite ± clinozoisite ± epidote ± sulphides ± gold ± silver |
| Альбитовая Albitic | (кварц) + кварц + серицит + лейкоксен + рутил + магнетит + пирит ± кальцит ± доломит – анкерит ± сидерит ± апатит + сульфиды + золото + серебро ± (кероген) + альбит (quartz) + quartz + sericite + leucoxene + rutile + magnetite + pyrite ± calcite ± dolomite – ankerite ± siderite ± apatite + sulphides + gold + silver ± (kerogene) + albite |
| Тыловая Rear | (кварц) + кварц + серицит + лейкоксен + рутил + магнетит + пирит ± кальцит ± анкерит ± сидерит ± брейнерит + апатит + сульфиды + золото + серебро (quartz) + quartz + sericite + leucoxene + rutile + magnetite + pyrite ± calcite ± ankerite ± siderite ± breunnerite + apatite + sulphides + gold + silver |

Изменения химических составов боковых пород в процессах околоразломного метасоматизма (табл. 5) обусловлены поступлением и фиксацией в них восстановленной серы (в сульфидах), углекислоты (в карбонатах), калия (в сериците), выносом из боковых пород натрия и частично кремния – явлениями, свойственными березитизации, представляющими типовые петрохимические черты этого процесса. Среди петрогенных компонентов наименьшую подвижность в объемах всех изученных метасоматических колонок демонстрирует глинозем

(Al), наибольшую – сера и углекислота, которые достигают, как правило, хлоритовой (эпидотовой), в некоторых колонках [3] фронтальной зон включительно с уменьшением их массы от тыловой зоны. Изменения осуществляются посредством концентрационной диффузии компонентов, механизм которой доказывается изменениями содержания химических элементов в минералах переменного состава в объеме одной (каждой) минералого-петрохимической зоны [2] и перемещением компонентов в колонках из пород с более высокими их концентрациями в породы с более низкими, то есть в направлении выравнивания концентраций [3].

В зонах деформационного воздействия рудо-контролирующих глубинных разломов в разных по минералого-химическим составам, возрасту, происхождению вмещающих разновозрастные месторождения породах, включая толщи черных сланцев, в процессах рудообразования формируются контрастные околорудные аномалии ассоциации фемофильных элементов в составе Ca, Mg, Fe, Ti, P, Mn, содержания которых максимальные, превышающие кларковые на сотни-тысячи процентов в тыловых зонах метасоматических колонок, в направлении фронтальной зоны последовательно, от зоны к зоне, снижаются до кларковых-субкларковых в исходных породах фронтальной зоны.

3. Обсуждение и выводы

Очевидно, в оценке достоверности теоретических положений, раскрывающих условия функционирования в прошлые геологические эпохи обсуждаемых гидротермальных рудообразующих процессов, приоритет принадлежит созданным природой гидротермальным месторождениям. В согласии с объективно обусловленным в данном случае индуктивным способом познания теория призвана объяснять содержание процессов, отвечать на вопрос – что происходит, в частности, при сопровождающем рудообразование метасоматизме, в каких условиях образуются обрамляющие и/или вмещающие рудные тела метасоматические ореолы. Естественно, теория будет жизнеспособна, если она адекватна природным объектам – их составам, внутреннему устройству, то есть достоверно описывает природные процессы и, следовательно, служит средством углубления знаний, расширения сферы их приложения.

В существующей теории метасоматической зональности, созданной на основе законов термодинамики, напротив, приоритет в оценке ее корректности принадлежит теоретическим построениям, которые, в свою очередь, составляют основу следующей из теории модели околоразломной (околожильной) метасоматической зональности. В истории исследования проблемы не осталось печатных следов содержательного анализа автором теории причин несоответствия прогнозируемой им теоретической модели метасоматической зональности с ее мономинеральной тыловой зоной природной и эксперимен-

Таблица 5. Баланс (вынос, привнос, в процентах) петрогенных элементов в зональных околорудных метасоматических ореолах мезотермальных месторождений золота Южной Сибири

Table 5. Balance (carry out, addition, in per cent) of petrogenous elements in zone near-ore metasomatic haloes of mesothermal gold deposits of South Siberia

| Минеральные зоны, подзоны Mineral zones and subzones | Химические элементы/Chemical elements | | | | | | | | | | | | | |
|--|---------------------------------------|-----|-----|-----|-------------|----------------|-------------|-------------|------------------|------------------|------------|------------|-------------|------|
| | Si | Al | K | Na | S* | C _o | Ca | Mg | Fe ²⁺ | Fe ³⁺ | Ti | P | Mn | Δ |
| 1. Месторождение Ирокинда/Irokinda deposit | | | | | | | | | | | | | | |
| 1.1. Граниты мигматитовой выплавки, AR ₂ (3)/Granites of migmatitic melting AR ₂ (3) | | | | | | | | | | | | | | |
| Фу (5) | 0 | 0 | -10 | -10 | + | 20 | 20 | 0 | 0 | 10 | 10 | 50 | -60 | 1,2 |
| Фи (6) | 0 | 0 | -10 | 0 | + | 220 | 70 | 30 | 30 | 70 | 20 | 110 | 0 | 3,1 |
| Х (9) | -10 | 10 | -40 | 40 | 0 | 500 | 70 | 60 | 0 | 60 | -10 | 210 | -50 | 6,9 |
| А (8) | 0 | 0 | -20 | -10 | + | 870 | 10 | 60 | 20 | 50 | 70 | 250 | 10 | 4,5 |
| Т (7) | -10 | 10 | 20 | -90 | + | 2400 | 200 | 220 | 100 | 230 | 250 | 650 | 30 | 18,8 |
| 1.2. Фельзитовые микрогранит-порфиры, PZ ₃ (5)/Felsitic microgranite-porphyrries, PZ ₃ (5) | | | | | | | | | | | | | | |
| Х (4) | -10 | 10 | 10 | 0 | -60 | 140 | 120 | 180 | 170 | 60 | 280 | 190 | 210 | 12,6 |
| А (6) | -30 | 10 | 70 | -50 | 20 | 300 | 240 | 330 | 330 | 80 | 500 | 310 | 330 | 27,0 |
| Т (6) | -30 | 20 | 160 | -90 | 1900 | 390 | 350 | 390 | 210 | 450 | 520 | 230 | 360 | 36,8 |
| 2. Кедровское месторождение/Kedrovskoe deposit | | | | | | | | | | | | | | |
| 2.1. Альмандин-двуслюдяные плагиогнейсы, PZ ₃ (1) Almandine-two-mica plagioclase gneisses, PZ ₃ (1) | | | | | | | | | | | | | | |
| Фу (1) | -2 | 2,8 | 66 | -55 | -49 | -48 | -14 | 10 | 44 | 37 | -12 | 143 | -27 | 7,0 |
| Х (1) | -4 | 8,4 | 14 | -21 | 160 | -27 | 36 | -48 | 22 | 35 | 10 | 68 | -35 | 6,0 |
| Т (1) | -48 | -46 | 27 | -96 | 2140 | 1330 | 716 | 439 | 65 | 61 | 98 | 653 | 42 | 45,0 |
| 2.2. Кварцевый диорит, гранодиорит, PZ ₃ (6)/Quartz diorite, granodiorite, PZ ₃ (6) | | | | | | | | | | | | | | |
| Х (16) | 0 | 0 | 0 | 0 | 1010 | 940 | 0 | 0 | 0 | -10 | 0 | 0 | 10 | 4,0 |
| А (6) | -10 | -10 | 20 | -10 | 3170 | 2070 | 30 | 50 | 60 | -30 | 90 | 50 | 40 | 12,0 |
| Т (1) | -50 | -20 | 40 | -80 | 4270 | 4700 | 220 | 240 | 170 | 320 | 170 | 160 | 240 | 41,0 |
| Углеродистые полевошпат-кварцевые сланцы кедровской свиты, R ₃ /Carbonaceous feldspar-quartz slates of kedrovskaya suite, R ₃ | | | | | | | | | | | | | | |
| 2.3. Метаалевропесчаники (10)/Metaaleuro-sandstones (10) | | | | | | | | | | | | | | |
| А (1) | -17 | 4,9 | 248 | -34 | + | 1905 | 33 | 1053 | 282 | 340 | 82 | 300 | 374 | 18,0 |
| Т (1) | -39 | 8,8 | 445 | -93 | + | 6913 | 880 | 1781 | 447 | 125 | 73 | 672 | 347 | 43,0 |
| 3. Месторождение Чертово Кoryто/Chertovo Koryto deposit | | | | | | | | | | | | | | |
| Углеродистые полевошпат-кварцевые сланцы михайловской свиты, PR ₁ /Carbonaceous feldspar-quartz slates of mikhaylovskaya suite, PR ₁ | | | | | | | | | | | | | | |
| 3.1. Крупнозернистые метаалевролиты (5)/Big-grain metaaleurolites (5) | | | | | | | | | | | | | | |
| У (2) | 0 | 0 | 0 | -10 | -30 | -10 | 50 | 20 | 0 | 30 | 10 | 0 | 0 | 2,9 |
| Х (8) | -20 | -30 | -30 | -70 | 120 | 1400 | 1180 | 100 | 70 | 10 | 540 | 840 | 560 | 29,7 |
| Т (1) | -40 | -30 | -10 | -90 | 0 | 2800 | 1920 | 170 | 30 | -90 | 570 | 900 | 2110 | 43,4 |
| 3.2. Мелкозернистые метапесчаники (5)/Fine-grain metasandstones (5) | | | | | | | | | | | | | | |
| У (1) | 0 | 0 | -30 | 80 | 180 | 40 | 30 | 10 | 0 | -20 | 30 | -30 | 100 | 3,5 |
| У (3) | 0 | 10 | -20 | 10 | 130 | 100 | 80 | 120 | 30 | 70 | 20 | 0 | 150 | 6,5 |
| Х (6) | -40 | 0 | -20 | -70 | 430 | 1910 | 1400 | 330 | 160 | 30 | 820 | 890 | 1750 | 34,9 |
| Т (1) | -30 | -10 | -10 | -90 | 10 | 1980 | 1260 | 260 | 110 | 180 | 790 | 870 | 3620 | 32,5 |
| 3.3. Разнозернистые метапесчаники (3)/Various-grain metasandstones (3) | | | | | | | | | | | | | | |
| У (1) | 0 | 0 | 70 | -70 | 1130 | 10 | -40 | 110 | 60 | 90 | 30 | -50 | 0 | 7,94 |
| Х (4) | -30 | -10 | 0 | -85 | 1640 | 1370 | 510 | 420 | 240 | 80 | 840 | 450 | 600 | 31,4 |
| Т (1) | -50 | -30 | -10 | -90 | 6570 | 3180 | 1300 | 690 | 250 | 490 | 490 | 640 | 4600 | 55,6 |

Примечание. 1) Минеральные зоны и подзоны околорудных метасоматических ореолов: Фу, Фи – подзоны умеренного и интенсивного изменения фронтальной зоны, У, Х, А, Т – соответственно углеродистая, хлоритовая, альбитовая, тыловая зоны. 2) S* – сера сульфидная, C_o – углерод окисленный (карбонатный), + – привнос S при содержании ее в исходной породе ниже предела чувствительности анализа. 3) В скобках – число проб, участвующих в расчете средних. 4) Δ – удельная масса перемещенного (привнесенного и вынесенного) вещества в процентах к массе вещества исходных пород в стандартном геометрическом объеме 10000 Å³. 5) Полные химические 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. Юминовой.

Note. 1) Mineral zones and subzones of near-ore metasomatic haloes: Фу, Фи are the subzones of moderate and intensive alteration of frontal zone; У, Х, А, Т are the carbonaceous, chloritic, albitic and rear zones. 2) S* is the sulfide sulphur, C_o is the carbon oxidized, H* is the hydrogen of water H₂O*. 3) The number of samples involved in calculation of the average is in brackets. 4) Δ is the specific weight of the removed (added and carried out) substance in relation in per cent to the weight of the initial rocks substance in standard geometric measurement 10000 Å³. 5) Complete chemical analysis of rocks was fulfilled in the Central laboratory of «ZapSibgeologiya» and in West-Siberian Test Center (Novokusnetsk) by I. Dubrovskaya and G. Yuminova.

тальной модели с их полиминеральной тыловой зоной при том, что возможности для выявления этого несоответствия были. Достаточно было выполнить балансовые расчеты межзональной миграции компонентов в природных метасоматических колонках, подобных приведенным в табл. 5, и теория была бы другой. В этом эпизоде видно одно из негативных проявлений человеческого фактора.

В приведенных материалах присутствуют все составляющие процедуры познания – идея, трансформированная в рабочую гипотезу и затем в теорию с созданием теоретической модели метасоматической зональности, в том числе в околоразломном (околожильном) варианте, результаты экспериментов по ее моделированию с получением экспериментальных метасоматических колонок, результаты изучения природных метасоматических колонок. Это обеспечивает возможность сравнительного анализа всех составляющих на предмет оценки корректности теории.

Концентрированное выражение теории метасоматической зональности Д.С. Коржинского – теоретическая модель ее обладает чертами сходства и различий с экспериментальными и околоразломной (околожильной) типовой природной аутентичной по минералого-петрохимическим чертам и порядку зональности во всех, включая черные сланцы, породах, метасоматическими колонками.

Сходство заключается в следующем:

- все колонки обладают минералого-петрохимической зональностью;
- предписанные теорией изменения минеральных составов пород в природных колонках в направлении от фронтальной зоны к тыловой, выражающиеся в последовательном, от зоны к зоне, замещении минералов исходных пород (пироксенов, амфиболов, биотита, полевых шпатов и других) и некоторых образованных в процессах метасоматизма (актинолита, тремолита, эпидота, хлоритов, альбита);
- смена в экспериментальных и природных метасоматических колонках минеральных ассоциаций березитового профиля в составе кварца, серицита, Mg-Fe карбонатов, альбита, сульфидов, образованных в тыловой и промежуточных зонах, минеральными ассоциациями пропиловитового профиля в составе актинолита-тремолита, эпидота, хлоритов, карбонатов, альбита – в периферийных зонах;
- слабо выраженная межзональная миграция компонентов во фронтальной и промежуточных зонах метасоматических колонок, усиливающаяся в тыловых зонах;
- привнос в метасоматические колонки калия, углекислоты, серы, вынос из них натрия, кремния – типовые петрохимические черты процесса образования березитов.

Отличия теоретической модели метасоматической зональности от экспериментальных и природных метасоматических колонок заключаются в следующем:

- декларируемое в теории уменьшение числа минеральных фаз на единицу в каждой более тыловой зоне «вплоть до мономинеральности» осевой зоны – кварцевой жилы – в экспериментах и природных процессах не достигается – кварцевые рудные жилы в природных колонках сложены агрегатом кварца, карбонатов, рудных минералов (иначе жильных рудных месторождений не существовало бы), а смежная с ней тыловая зона – березитом в составе кварца, серицита, анкерита, пирита, рутила. Напротив, теория, как отмечалось, отводит место березитам в приведенном стандартном составе в одной из промежуточных между фронтальной и тыловой зон [1]. При всем этом приходится констатировать, что следующая из теории модель минеральной зональности с мономинеральной тыловой зоной рассматривается некоторыми авторами как эталонная [10–12], с которой следует сравнивать природные колонки. Мономинеральность осевой зоны природных колонок достигается в редких случаях, например в случае воздействия на толщи кварцитов растворяющих кварц горячих щелочных растворов, не содержащих, кроме щелочей, соединений металлов, в результате которого вследствие обогащения кремневой кислотой и трансформации по этой причине растворов в кислотные образованы в промышленных масштабах хрусталоносные мономинеральные кварцевые жилы, в частности, – на Алдане, Полярном Урале, в Бразилии;
- предусмотренный в теории вынос из тыловой зоны системы околоразломного (околожильного) метасоматизма всех, кроме образующих ее, компонентов опровергается результатами балансовых расчетов их межзональной миграции в природных метасоматических колонках (табл. 5). Как отмечалось, устойчиво из тыловых зон системы удаляется почти полностью натрий, вытесняемый более сильным основанием калием, и частично (до 50 мас. % от исходного содержания) – кремний, используемый природой для строительства кварцевых жил и освобождения места в тыловых зонах для поступающих из трещинных растворов компонентов. Часть компонентов перераспределяется внутри зон и между зонами, диффундируя из областей более высоких концентраций в области более низких [3, 9]. Вопреки теории, значительная часть компонентов, в том числе фемофильных в обрамлении глубинных разломов, поступает в систему «порода – поровый раствор – трещинный раствор» из трещинных растворов. Компоненты, обладающие разной подвижностью, в том числе диффундирующие с разной скоростью, в основном обогащают тыловые зоны, но проникают в хлоритовую (так называемые в теории «инертные при всех условиях» Ti и P) и даже во фронтальную (K, CO₂, S, Fe, Ti, P) зоны. Последнее связывает пропиловитовую и бе-

резитовую составляющие околорудных метасоматических колонок, в том числе в черных сланцах, в единое гармонично устроенное целое как образованное в результате единого аллохимического процесса, инициированного горячими растворами, генерированными, судя по совокупности данных [9], в мантийных очагах умеренно щелочных базальтовых расплавов.

Приведенные факты участия в полном объеме метасоматических колонок в составе гидротермальных минеральных новообразований не только наиболее подвижных S, CO₂, но и фемофильных металлов, поступающих извне ареалов гидротермальных аллохимических изменений земной коры, формируют приоритет представления о принадлежности метасоматических ореолов-колонок к пропилитовой и березитовой метасоматическим формациям, сочетающимся в их (ореолов) объемах, а не к производным регионального метаморфизма гидратации, с которыми многие геологи в разных регионах связывают рудообразование – на Северо-Востоке России [13, 14], в Кодаро-Удоканской и Таллаи-Каралонской структурно-формационных зонах Северного Забайкалья [15], Тыйско-Олокитском метаморфическом поясе Северного Прибайкалья [16], в Ленском районе [17], в Северном Китае [18], Западной Австралии [19], в орогенных районах мира [20].

Как известно, в теории и в природном метасоматическом процессе формирования метасоматической зональности заложен основополагающий сформулированный Д.С. Коржинским принцип дифференциальной подвижности компонентов, определяемой их свойствами, термодинамическими и физико-химическими режимами среды порообразования. Вместе с тем констатация того факта, что между теоретической моделью околоразломной метасоматической зональности и приоритетной для установления истины типовой природной околоразломной (околоразломной) метасоматической колонкой мало общего, требует выяснения причин этого несоответствия, чтобы понять, почему первая не согласуется со второй и какие выводы могут последовать из этого понимания для коррекции теории.

Первая причина заключается в том, что при поступлении в разломы инициирующих метасоматизм горячих растворов в гидравлически связанных системах «порода – поровый раствор – трещинный раствор» происходит встречная концентрационная диффузия компонентов, обусловленная возникновением градиентов концентраций компонентов, часть которых при растворении минералов переходит из инертного состояния в подвижное (в раствор) и мигрирует в области пониженных содержания формирующихся метасоматических колонок, в том числе в трещинные растворы (Si, Na). Другие компоненты поступают с трещинными растворами извне (K, CO₂, S), диффундируют в поровые растворы, входят в составы образующихся минералов, то есть переходят в

инертное состояние. Все это можно видеть в результатах балансовых расчетов миграции петрогенных компонентов в сочетании с минеральными составами метасоматических пород (табл. 4, 5) [3, 9].

Те компоненты, которые не отличаются высокой подвижностью и диффундируют из трещинных растворов в поровые медленно, прежде всего фемофильные, как правило, образуют контрастные аномалии в тыловой и смежной с ней зонах (табл. 5). Вместе с тем преобладание числа диффундирующих в метасоматические колонки в разных сочетаниях компонентов (K, S, CO₂, Ca, Mg, Fe, P, Ti, Mn) над числом удаляющихся из них (Na, Si) означает, что в процессах формирования околоразломной метасоматической зональности закон концентрационной диффузии, действующий при возникновении градиентов концентраций компонентов в гидравлически связанных системах «порода – трещинный раствор – поровый раствор», приоритетнее законов термодинамики, регламентирующих, согласно теории, вынос из тыловых зон почти всех компонентов, кроме тех двух (Si, O), которые должны образовать тыловую (осевую) мономинеральную зону – кварцевую жилу. В реальных условиях образование мономинеральной зоны в тылу околоразломных (околожилных) метасоматических колонок в рудных месторождениях невозможно.

Вторая причина заключается в том, что при доказанном С.С. Смирновым еще в 40-х годах прошлого столетия [9] пульсационном (порционном) режиме функционирования гидротермальных рудообразующих процессов теория метасоматической зональности разрабатывалась, однако, для эволюционного режима, предполагающего непрерывное истечение металлоносных растворов из источников их генерации.

По современным данным [9] порционный режим поступления металлоносных растворов в области рудообразования доказывается независимыми фактами: 1) чередующимся во времени внедрением силикатных расплавов и металлоносных растворов подобно тому, как в областях вулканической деятельности истечение вулканических газов – надкритических металлоносных флюидов – чередуется с излияниями, выбросами силикатных расплавов; 2) повторяющейся в составе каждого рудно-минерального комплекса последовательностью отложения кварца, сульфидов, карбонатов; 3) повторяющимся возрастанием температур отложения ранних зарождений кварца в составе каждого рудно-минерального комплекса над температурами отложения поздних зарождений кварца каждого предшествующего рудно-минерального комплекса.

Вероятно, порционный режим поступления металлоносных растворов вносит наибольшие осложнения в процесс формирования околоразломной (околоразломной) метасоматической зональности, чрезвычайно трудно поддающийся моделирова-

нию вследствие, в частности, изменений составов и концентраций растворенных компонентов, включая те, которые влияют на физико-химическое состояние растворов последовательно сменяющихся порций, и/или изменений путей миграции последних в процессе формирования разломной структуры месторождений.

Из приведенных результатов анализа теории окolorазломной метасоматической зональности Д.С. Коржинского следует очевидная необходимость коррекции ее на предмет приведения новой концепции в соответствие с природными процессами. В последние годы это стало возможным потому, что знания о последних значительно углублены и расширены сравнительно со временем создания теории и многие ранее дискуссионные положения получили статус достоверного знания или отвергнуты, а возможности принятия верных решений возросли.

Вместе с тем приходится констатировать, что несостоятельность некоторых упомянутых выше считавшихся важными для развития и углубления теории положений была известна и в годы разработки теории, но они (положения) были учтены в теории и законсервированы в ней до сих пор. В этом и других подобных фактах видно негативное влияние человеческого фактора, тормозящего развитие теории на многие годы.

В коррекции представлений об условиях возникновения в процессах гидротермального рудообразования окolorазломной (околожильной) метасоматической зональности и в создании адекватной природным процессам альтернативной существующей теории концепции формирования окolorазломной метасоматической зональности учитываются следующие определяющие ее или влияющие на нее действующие одновременно или последовательно факты:

- факт, определяющий застойный режим трещинных (в отличие от теории) и поровых гидравлически связанных растворов в окolorазломных породно-флюидных системах;
- факт, определяющий в согласии с теорией Д.С. Коржинского переход в растворенное, то есть подвижное, состояние в конкретных термодинамических и физико-химических условиях высвобождающихся при замещении, растворении минералов компонентов и диффузию их в соответствии с градиентами концентраций каждого из них, обуславливающую, согласно результатам балансовых расчетов межзональной миграции компонентов, но вопреки теории, преимущественно перераспределение их внутри метасоматических колонок и устойчивую миграцию из них всего лишь двух компо-

- используемый в теории факт дифференциальной подвижности компонентов, определяющей большую или меньшую подвижность – инертность каждого компонента в конкретных сочетаниях термодинамических и физико-химических меняющихся во времени и пространстве (от одной порции растворов и минеральной зоны к той и другой) условий минералообразования, наиболее сложный для разработки в процедуре реконструкции процессов;
- факт, определяющий, вопреки теории, диффузию в поровые растворы на большие или меньшие расстояния от раствороподводящих разломов большинства компонентов, диффундирующих с большей или меньшей скоростью из поступавших в систему трещинных растворов в соответствии со свойствами и градиентами концентраций каждого из них;
- факт порционного, вопреки теории, поступления в формирующиеся метасоматические колонки металлоносных растворов, как следствие, – пространственного усложняющего структуру метасоматической зональности смещения в разных сочетаниях минеральных ассоциаций – производных сменяющихся во времени порций металлоносных растворов, образующих, как отмечалось, в сочетании с поровыми растворами вмещающих пород гидравлически связанные системы.

4. Заключение

Существующая теория окolorазломной (околожильной) метасоматической зональности не описывает условия ее формирования в сопровождающих руды повторяющихся во множестве мезотермальных месторождений золота (и других металлов) метасоматических колонках пропилит-брезитовой формаций, но прогнозирует эти условия, как если бы результаты изучения созданных природой метасоматических колонок было невозможно получить. Негативный результат прогноза обсуждается в приведенных материалах – он есть следствие того, что не все условия – факторы, определяющие образование метасоматической зональности или влияющие на нее, заложены в теории. Представляется также завышенным приоритет законов термодинамики над другими, в частности концентрационной диффузии, определяющими направление, в том числе встречное, скорости миграции компонентов и другие процессы окolorазломного метасоматизма.

Очевидна необходимость углубления теории метасоматической зональности как составной части теории эндогенных пороудо-рудообразующих процессов, в которой были бы учтены факты и полученные результаты, адекватные природным процессам.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Коржинский Д.С. Очерк метасоматических процессов // Основные проблемы в учении о магматогенных рудных месторождениях / под ред. акад. А.Г. Бетехтина, доктора геол.-минер. наук Г.А. Соколова. – М.: Изд-во АН СССР, 1955. – С. 335–456.
2. Коржинский Д.С. Теория метасоматической зональности. – М.: Наука, 1982. – 104 с.
3. 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.
4. Зарайский Г.П., Шаповалов Ю.Б. Экспериментальное исследование физико-химических условий березитизации // Доклады АН СССР. – 1978. – Т. 238. – № 1. – С. 207–210.
5. Экспериментальное исследование зональности и условий формирования рудоносных метасоматитов стадии кислотного выщелачивания / Г.П. Зарайский, Ю.Б. Шаповалов, В.Н. Балашов, Ф.М. Стояновская, Е.В. Рядчикова, К.В. Мартынов // Эксперимент в решении актуальных задач геологии. – М.: Наука, 1986. – С. 250–276.
6. Зарайский Г.П. Зональность и условия образования метасоматических пород. – М.: Наука, 1989. – 344 с.
7. Kucherenko I.V., 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. Article number 012006. URL: <http://iopscience.iop.org/article/10.1088/1755-1315/27/1/012024> (дата обращения 03.05.2017).
8. Kucherenko I., Cherkasova T., 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. Article number 012003. URL: <http://iopscience.iop.org/article/10.1088/1755-1315/27/1/> (дата обращения 03.05.2017).
9. Кучеренко И.В., Гаврилов Р.Ю., Синкина Е.А. Золоторудное месторождение Чертово Кoryто: геология, рудно-минеральные комплексы, генезис. – Saarbrücken: Palmarium academic publishing, 2016. – 365 с.
10. Метасоматизм и метасоматические породы / В.А. Жариков, В.Л. Русинов, А.А. Маракушев, Г.П. Зарайский, Б.И. Омеляненко, Н.Н. Перцев, И.Т. Росс, О.В. Андреева, С.С. Абрамов, К.В. Подлесский. – М.: Научный мир, 1998. – 492 с.
11. Околорудный метасоматизм терригенных углеродистых пород в Ленском золоторудном районе / В.Л. Русинов, О.В. Русинова, С.Г. Кражев, Ю.В. Щегольков, Э.И. Алышев, С.Е. Борисовский // Геология рудных месторождений. – 2008. – Т. 50. – № 1. – С. 3–46.
12. Рудно-метасоматическая и геохимическая зональность золото-рудных полей и месторождений складчатых поясов Сибири / А.Ф. Коробейников, Ю.С. Ананьев, А.И. Гусев, В.Г. Ворошилов, Г.Г. Номоконова, А.Я. Пшеничкин, Т.В. Тимкин. – Томск: Изд-во Томского политехнического университета, 2013. – 458 с.
13. The Noble Metal Distribution in the Black Shales of the Degdekan Gold Deposit in Northeast Russia / A.I. Khanchuk, L.P. Plusnina, E.M. Nikitenko et al. // Russian journal of Pacific Geology. – 2011. – V. 5. – № 2. – P. 89–96.
14. Volkov A.V., Murashov K.Y., Sidorov A.A. Geochemical peculiarities of ores from the largest Natalka gold deposit in Northeastern Russia // Doklady Earth Sciences. – 2016. – V. 466. – № 2. – P. 161–164.
15. Abramov B.N. The formation of black shale gold deposits in the southern environs of the Siberian Platform (Kodaro-Udokanskaya and Tallai-Karalonskaya zones) // Doklady Earth Sciences. – 2013. – V. 449. – № 2. – P. 371–374.
16. Сизых А.И., Юденко М.А. Метаморфизм и метаморфогенное рудообразование Тыйско-Олокинского метаморфического пояса Северного Прибайкалья // Геология и полезные ископаемые Восточной Сибири / под ред. А.И. Сизых. – Иркутск: Изд-во Иркутского гос. ун-та, 2013. – С. 68–78.
17. Gold mineralization and orogenic metamorphism in the Lena province of Siberia as assessed from Chertovo Koryto and Sukhoi Log deposits / M.A. Yudovskaya, V.V. Distler, V.Yu. Prokofiev, N.N. Akinfiev // Geoscience Frontiers. – 2015. DOI: 10.1016/j.gsf.2015.07.010.
18. Gold mineralization in Proterozoic black shales: example from the Haoyaerhudong gold deposit, northern margin of the North China Craton / Wang Jianping, Liu Jiagun, Peno Runmin, Liu Zhenjiang, Zhao Baisheng, Li Zan, Wang Yufeng, Lui Chonghao // Ore Geology Reviews. – 2014. – V. 63. – P. 150–159.
19. 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.
20. Groves D.I., Santosh M. The giant Jiaodong gold province: the key to a unified model for orogenic gold deposits? // Geoscience Frontiers. – 2016. – № 7. – P. 409–417.

Поступила 25.05.2017 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 553.242.4:167–047.58

ORE GEOLOGY PROBLEMS AND THE HUMAN FACTOR. PART 1. MINERAL-PETROCHEMIC ZONING OF THE NEAR-VEINS METASOMATIC AUREOLES IN THE MESOTHERMAL GOLD DEPOSITS: THEORY, EXPERIMENT, NATURE

Igor V. Kucherenko,
kivr@tpu.ru

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

The relevance of the research. In reconstruction of gold, coloured metals, uranium deposits formation there are the problems which have not been solved up to now. The evident necessity in correct solutions of these problems for deepening – developing – hydrothermal ore-formation theory and improving the forecast-prospecting criteria mineralization complexes encourages the search and elimination of objective and possible subjective reasons leading to endless discussions justified before by shortage of data but which became more intelligible as much as new knowledge accumulation.

The main aim of the research. To develop the discrepancies reasons identical to the natural processes of their reconstruction and elimination of the reasons, estimated by the author as subjective ones, the author suggests and discusses the known before and authors' solutions of the following key debatable ore geology problems: 1) problem of near-ore metasomatic zoning formation in its near-vein (near-fracture) version; 2) problem of gold sources concentrated in ores among crystalline substratum and black shales; 3) problem of formation of mesothermal gold deposits leading to magmatism and metamorphism; 4) problem of formational typization of hard useful mineral deposits as means of realization of the objective priority inductive method of ore-formation understanding in combining with the deductive one.

The methods of the research. To solve each problem the author: 1) analyzed the existing ideas for appraisal of their conformity to contemporary data; 2) introduces the author's materials, suggested for substantiation of the problems correct solutions, and they are discussed.

The results of the research. In solution of the first problem by means of the results analyses of mineral-petrochemical study of the beresite metasomatic formation zone columns, formed in plutonic and volcanic, metamorphic, sedimentary, including black shales, rocks in nineteen gold mesothermal deposits of Siberian craton south mountain-folded frame and other regions it is explained the non-conformity of the following from the D.S. Korzhinsky metasomatic zoning theory model to natural metasomatic columns – the monomineral rear zone prescribed by the theory is not formed. In rear zone the mineral number is comparable with mineral number in other zones, including that in initial rocks. Polymineral composition of the rear zone of the metasomatic columns is caused by migration of the petrogenous components, proved by balance calculations, – their counter diffusion from fracture solutions to pore solutions of side rocks and from pore solutions to fracture solutions as well as by portioning mode of the injection of metal-bearing fluids into blocks of rock-ore-formation. Negative effect of the human factor is expressed in the following. In the metasomatic zoning theory in its near-vein version, developed on the base of the thermodynamics laws, **the other mentioned known in years of the theory creation natural factors – counter diffusion components in fracture – rock systems and pulsational** (but non evolutionary according to the theory) mode of functioning of ore-forming processes were not taken into account. As a result theoretical and natural near-vein (fracture) metasomatic columns were not compared. It is necessary to develop near-vein metasomatic zoning theory adequate in all natural processes causing near-ore endogenous metasomatic zoning.

Key words:

Mesothermal gold deposits, theoretical, experimental, natural models of the near-vein metasomatic beresite formation columns, natural and human factors.

REFERENCES

1. Korzhinsky D.S. Oчерk metasomaticheskikh processov [Study of metasomatic processes]. *Osnovnye problemy v uchenii o magmatogennykh rudnykh mestorozhdeniyakh* [The key issues in study of magmatogenic ore fields]. Ed. by A.G. Betekhtin, G.A. Sokolov. Moscow, AS USSR Press, 1955. pp. 335–456.
2. Korzhinsky D.S. *Teoriya metasomaticheskoy zonalnosti* [Theory of metasomatic zoning]. Moscow, Nauka Publ., 1982. 104 p.
3. Kucherenko I.V. Hydrodynamics of the fracture-pore fluid-rock interactions and mass transfer mechanism in the adjacent-fracture hydrothermal metasomatic processes. *Prospect and protection of mineral resources*, 2010, no. 11, pp. 37–43.
4. Zaraysky G.P., Shapovalov Yu.B. Eksperimentalnoe issledovanie fiziko-khimicheskikh usloviy berezitivatsii [Experimental research of physical and chemical conditions of beresitization]. *Doklady AN SSSR*, 1978, vol. 238, no. 1, pp. 207–210.
5. Zaraysky G.P., Shapovalov Yu.B., Balashov V.N., Stoyanovskaya F.M., Ryadchikova E.V., Martynov K.V. Eksperimentalnoe issledovanie zonalnosti i usloviy formirovaniya rudonosnykh metasomatitov stadii kislotnogo vyshchelachivaniya [Experimental research of zoning and conditions of forming ore-bearing metasomatites of acid leaching stage]. *Eksperiment v reshenii aktualnykh zadach geologii* [Experiment when solving the current tasks of geology]. Moscow, Nauka Publ., 1986. pp. 250–276.
6. Zaraysky G.P. *Zonalnost i usloviya obrazovaniya metasomaticheskikh porod* [Zoning and conditions of metasomatic rock formation]. Moscow, Nauka Publ., 1989. 344 p.
7. Kucherenko I.V., 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, vol. 27. Article number 012006. Available at: <http://iopscience.iop.org/article/10.1088/1755-1315/27/1/012024> (accessed 03 May 2017).
8. Kucherenko I., Cherkasova T., 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, vol. 27. Article number 012003. Available at: <http://iopscience.iop.org/article/10.1088/1755-1315/27/1/> (accessed 03 May 2017).

9. Kucherenko I.V., Gavrillov R.Yu., Sinkina E.A. *Zolotorudnoe mestorozhdenie Chertovo Koryto: geologiya, rudno-mineralnye komplekxy, genezis* [Gold ore field Chertovo Koryto: geology, ore-mineral complexes, genesis]. Saarbrücken, Palmarium academic publishing, 2016. 365 p.
10. Zharikov V.A., Rusinov V.L., Marakushev A.A., Zaraysky G.P., Omelyanenko B.I., Pertsev N.N., Ross I.T., Andreeva O.V., Abramov S.S., Podlessky K.V. *Metasomatizm i metasomaticheskie porody* [Metasomatism and metasomatic rocks]. Moscow, Nauchny mir Publ., 1998. 492 p.
11. Rusinov V.L., Rusinova O.V., Kryazhev S.G., Shchegolkov Yu.V., Alyshev E.I., Borisovsky S.E. Okolorudny metasomatizm terrigennykh uglerodistykh porod v Lenskom zolotorudnom rayone [Wallrock metasomatism of terrigenous carbonic rocks in Lensky gold ore area]. *Geologiya rudnykh mestorozhdeny*, 2008, vol. 50, no. 1, pp. 3–46.
12. Korobeynikov A.F., Ananov Yu.S., Gusev A.I., Voroshilov V.G., Nomokonova G.G., Pshenichkin A.Ya., Timkin T.V. *Rudno-metasomaticheskaya i geokhimicheskaya zonalnost zolotorudnykh poley i mestorozhdeny skladchatykh poyasov Sibiri* [Ore-metasomatic and geochemical zoning of gold ore fields and deposits of folded zones in Siberia]. Tomsk, Tomsk Polytechnic University Publ. house, 2013. 458 p.
13. Khanchuk A.I., Plyusnina L.P., Nikitenko E.M. The Noble Metal Distribution in the Black Shales of the Degdekan Gold Deposit in Northeast Russia. *Russian journal of Pacific Geology*, 2011, vol. 5, no. 2, pp. 89–96.
14. Volkov A.V., Murashov K.Y., Sidorov A.A. Geochemical peculiarities of ores from the largest Natalka gold deposit in Northeastern Russia. *Doklady Earth Sciences*, 2016, vol. 466, no. 2, pp. 161–164.
15. Abramov B.N. The formation of black shale gold deposits in the southern environs of the Siberian Platform (Kodaro-Udokanskaya and Tallai-Karalonskaya zones). *Doklady Earth Sciences*, 2013, vol. 449, no. 2, pp. 371–374.
16. Sizykh A.I., Yudenko M.A. Metamorfizm i metamorfogennoe ru-dobrazovanie Tyysko-Olokitskogo metamorficheskogo poyasa Severnogo Pribaykalya [Metamorphism and metamorphogenetic mineralization of Tysk-Olokitsky metamorphic zone of Northern Baikal]. *Geologiya i poleznye iskopaemye Vostochnoy Sibiri* [Geology and natural resources of Eastern Siberia]. Ed by. A.I. Sizykh. Irkutsk, Irkutsk State University Press, 2013. pp. 68–78.
17. Yudovskaya M.A., Distler V.V., Prokofiev V.Yu., Akinfiyev N.N. Gold mineralization and orogenic metamorphism in the Lena province of Siberia as assessed from Chertovo Koryto and Sukhoi Log deposits. *Geoscience Frontiers*, 2015. DOI: 10.1016/j.gsf.2015.07.010.
18. Wang Jianping, Liu Jiagun, Peno Runmin, Liu Zhenjiang, Zhao Baisheng, Li Zan, Wang Yufeng, Lui Chonghao. Gold mineralization in Proterozoic black shales: example from the Haoyaoerhudong gold deposit, northern margin of the North China Craton. *Ore Geology Reviews*, 2014, vol. 63, pp. 150–159.
19. 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.
20. Groves D.I., Santosh M. The giant Jiaodong gold province: the key to a unified model for orogenic gold deposits? *Geoscience Frontiers*, 2016, no. 7, pp. 409–417.

Received: 25 May 2017.

Information about the authors

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