

УДК 553.065.1549.08549.612

Au–Ag МИНЕРАЛИЗАЦИЯ ПОРФИРОВО-ЭПИТЕРМАЛЬНЫХ СИСТЕМ БАИМСКОЙ ЗОНЫ (ЗАПАДНАЯ ЧУКОТКА, РОССИЯ)

© 2016 г. Ю. Н. Николаев^a, И. А. Бакшеев^a, В. Ю. Прокофьев^{b, *},
Е. В. Нагорная^c, Л. И. Марушенко^a, Ю. Н. Сидорина^a, А. Ф. Читалин^d, И. А. Калько^a

^aМосковский государственный университет им. М.В. Ломоносова
119234, Москва, Ленинские горы

^bИнститут геологии рудных месторождений, петрографии, минералогии и геохимии РАН
119017, Москва, Ж-17, Старомонетный пер., 35

^cИнститут геохимии и аналитической химии им. В.И. Вернадского
РАН 119991, Москва, пр. Косыгина, 19

^dООО “Региональная горнорудная компания”, 115035, Москва, ул. Садовническая, 4
*E-mail: vpr@igem.ru

Поступила в редакцию 22.07.2015 г.

Проведены минералогические, термобарогеохимические и геохимические исследования благороднометалльного оруденения Баимской рудной зоны на Западной Чукотке. Золото-медно-молибден-порфиновые месторождения и проявления Баимской зоны пространственно сопряжены с монцонитоидами раннемелового едгыкычского комплекса. Выявлены четыре типа ассоциаций с минералами благородных металлов: 1) халькопирит + борнит + кварц с высокопробным самородным золотом в виде вростков в борните; 2) низкомарганцовистый доломит + кварц + сульфиды (халькопирит, сфалерит, галенит, теннантит-тетраэдрит) ± турмалин с низкопробным самородным золотом и гесситом; 3) родохрозит + высокомарганцовистый доломит + кварц + сульфиды (халькопирит, сфалерит, галенит, теннантит-тетраэдрит) с низкопробным самородным золотом, электрумом, акантитом, Ag и Au–Ag теллуридами и Ag сульфосолями; 4) кальцит + кварц + сульфиды (халькопирит, сфалерит, галенит) с низкопробным самородным золотом, сульфидами и селенидами серебра и серебряносодержащие сульфосолями. Изучение газово-жидких включений в кварце, сфалерите, флюорите показало, что гидротермальное рудоотложение в пределах Баимской рудной зоны происходило в широком интервале температур (594–104°C) и давлений (1200–170 бар) из водных флюидов с сильно менявшейся соленостью. Предложен показатель вертикальной геохимической зональности $AgPbZn/CuBiMo$. Диапазоны значений этого показателя позволяют оценить уровень эрозионного среза проявлений порфирово-эпитермальной системы. По мере увеличения уровня эрозионного среза в пределах Баимской зоны объекты располагаются в следующем порядке: месторождение Весеннее → проявление Прямое → проявление Находка → месторождение Песчанка → проявление III Весеннее.

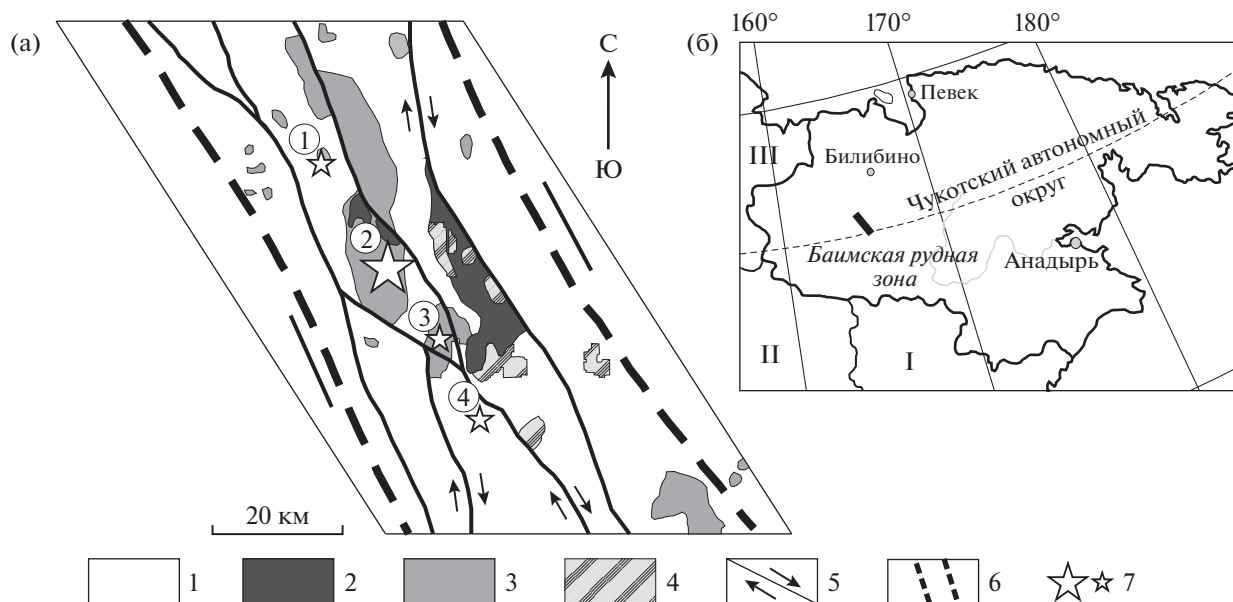
DOI: 10.7868/S0016777016040055

ВВЕДЕНИЕ

Благороднометалльное оруденение (Au, Ag, PGE) типично для медно-молибден порфириновых месторождений (Sillitoe, 2010; и др.). В ряде случаев оно образует крупнейшие по запасам месторождения золота, например, Пиббл в США (3050 т) и Грасберг в Индонезии (2900 т). В некоторых месторождениях порфирирового типа отмечается повышенная концентрация палладия (Санто-Томас II, Филиппины; Елаците, Болгария; Бошекуль, Казахстан; Кальмакыр, Узбекистан) (Tarkian, Koorman, 1995; Tarkian *et al.*, 2003; Pašava *et al.*, 2010).

Согласно обобщенной модели медно-порфировой системы (Sillitoe, 2010), золотая минерализация локализуется непосредственно в рудном

медном штокверке и за его пределами. Во втором случае она находится в основном в составе HS (high sulfidation, высокосульфидизированные) и IS (intermediate sulfidation, промежуточно-сульфидизированные) типов эпитермальной минерализации, субэпитермальных (переходных, постпорфирировых, до-эпитермальных) карбонат-полиметаллических рудах и сопровождается минералами серебра. В рудном штокверке золото ассоциирует с борнитом и халькопиритом; набор ассоциирующих минералов в эпитермальных рудах идентичен таковым в собственно эпитермальных месторождениях (галенит, сфалерит, халькопирит, энаргит, теннантит-тетраэдрит, голдфиллит, акантит, гессит, штюцит, сильванит), а в субэпитермальных



Фиг. 1. Структура (а) и географическое положение (б) Баймской рудной зоны. I – Камчатский край, II – Магаданская область; III – Республика Саха (Якутия). 1 – складчато-надвиговый палеозойско-мезозойский структурный комплекс, 2 – нижнемеловые вулканогенные и вулканогенно-терригенные отложения, 3 – раннемеловой интрузивный егдыгкычский комплекс, 4 – позднемеловой интрузивный омчакский комплекс, 5 – правые сдвиги, 6 – контуры Баймской рудной зоны, 7 – молибден-медно-порфировые месторождения и проявления. Цифры в кружках: 1 – рудное поле Юрях, 2 – рудное поле Песчанка, 3 – рудное поле Находка, 4 – рудное поле Омчак.

золото ассоциирует с галенитом, сфалеритом, теннантитом-тетраэдритом, халькопиритом, гесситом, петцитом, штютцитом (LeFort *et al.*, 2011).

В настоящей статье рассмотрены минеральные ассоциации, геохимические особенности и условия формирования благороднометалльной минерализации Баймской рудной зоны, включающей крупное золото-молибден-медно-порфировое месторождение Песчанка и ряд рудопроявлений.

ГЕОЛОГИЧЕСКОЕ СТРОЕНИЕ БАЙМСКОЙ РУДНОЙ ЗОНЫ

Баймская рудная зона расположена в юго-восточной части Аноийского нагорья, в пределах низкогогорья, расчлененного водотоками водосборного бассейна среднего течения р. Большой Аной. Баймская рудная зона протягивается в субмеридиональном направлении приблизительно на 90 км и приурочена к системе крупных разломов северо-западного простирания преимущественно правосдвиговой кинематики раннемелового возраста (Читалин и др., 2013) (фиг. 1). Сопряженными с главными сдвигами являются меридиональные сбросы и отрывы, контролирующие рудные штокверки медно-порфировых месторождений, левые сдвиги и сбросо-сдвиги северо-восточного простирания, а также пологие надвиги (в 2013 г в долине р. Егдыгкыч профилем разведочных скважин пересечено разрывное на-

рушение, по которому монцодиориты надвинуты на угленосные терригенные отложения раннемеловой айнахкургенской свиты). В геологическом строении описываемой территории принимают участие раннеюрские туфогенно-терригенные отложения, слагающие крупную брахиантиклиналь, слабо вытянутую в север-северо-восточном направлении, по обрамлению которой развиты раннемеловые вулканогенные и вулканогенно-терригенные породы.

К ранним интрузивным образованиям относятся гипербазиты раннетриасового алуцинского комплекса, слагающие Алуцинское поднятие и, возможно, имеющие аллохтонное залегание.

Позднеюрские вулканогенно-осадочные породы прорываются телами баймского, егдыгкычского и омчакского интрузивных комплексов.

Позднеюрский баймский габбро-диоритовый интрузивный комплекс представлен небольшими штоками (0.1–0.5 км²) и мелкими дайками. Интрузивные тела сложены мелко-среднезернистыми габбро, как правило, слабо пропицитизированными.

Раннемеловой сиенит-монцонитовый егдыгкычский плутонический комплекс сформировался в условиях островной вулканической дуги позднеюрского-раннемелового возраста (Волков и др., 2006). Комплекс сложен породами четырех фаз внедрения: 1) порфировидные диориты, 2) монцодиориты, 3) сиениты и 4) монцодиорит-

порфиры и кварцевые монцодиорит-порфиры. Молибден-меднопорфировое оруденение рудной зоны пространственно связано со штоками и крупными дайками четвертой фазы. По данным U/Pb датирования циркона, возраст пород егдыкычского комплекса составляет 139–143 млн лет (Moll-Stalcup, 1995; Котова и др., 2012; Бакшеев и др., 2014).

Позднемеловой омчакский комплекс представлен относительно крупными телами кварцевых порфиров и гранодиорит-порфиров и дайками этих пород, которые подверглись незначительным гидротермальным изменениям.

К наиболее поздним магматическим образованиям относятся дайки позднемеловых базальтов и андезитов, прорывающие верхнеюрские и нижнемеловые отложения. Базальты и андезиты слабо и не повсеместно затронуты метасоматическими изменениями.

Общую морфологию и структурные особенности Баймской рудной зоны определяют разломы северо-западного, субмеридионального направлений: Весеннинский (западный) и Восточный, а также диагональные рудоподводящие Баймский и Находкинский разломы, к которым приурочены мощные зоны дробления и смятия, субвулканические и гидротермальные образования: штокверки, жилы, небольшие тела флюидогенных (эксплозивно-гидротермальных) брекчий. Зоны повышенной трещиноватости, примыкающие к этим разломам, вмещают штокверки Cu–Mo-порфирового оруденения. На площади месторождений интрузивные магматические и вулканогенно-осадочные породы калишпатизированы, пропилитизированы, серицитизированы и аргиллизированы.

Баймская рудная зона включает 4 молибден-меднопорфировых рудных поля (с севера на юг): Юрях, Песчанка, Находка и Омчак, из которых наиболее значимы и изучены Песчанка и Находка.

Благороднометальная минерализация изучена нами на месторождении Песчанка, рудном поле Находка, проявлениях Правый Светлый и Вилка в рудном поле Омчак.

Месторождение Песчанка имеет площадь 22 км² и запасы, утвержденные в ГКЗ РФ категорий С1 + С2 и прогнозные ресурсы категории Р1 по состоянию на 1 января 2012 г. при бортовом содержании условной меди 0.4%: 960.11 млн т руды, 6.68 млн т Cu, 177.35 тыс. т Mo, 378.11 т Au, 3497 т Ag (Читалин и др., 2013). Месторождение локализовано в восточной части крупного многофазного Егдыкычского плутона, интрузирующего верхнеюрские вулканогенно-осадочные отложения. Интрузив сложен в значительной степени монцодиоритами второй фазы и, в существенно меньшей степени, сиенитами третьей фазы внедрения (фиг. 2а). Породы второй фазы прорваны телами

монцодиорит- и кварцевых монцодиорит-порфиров четвертой фазы, с которыми пространственно и парагенетически связано оруденение.

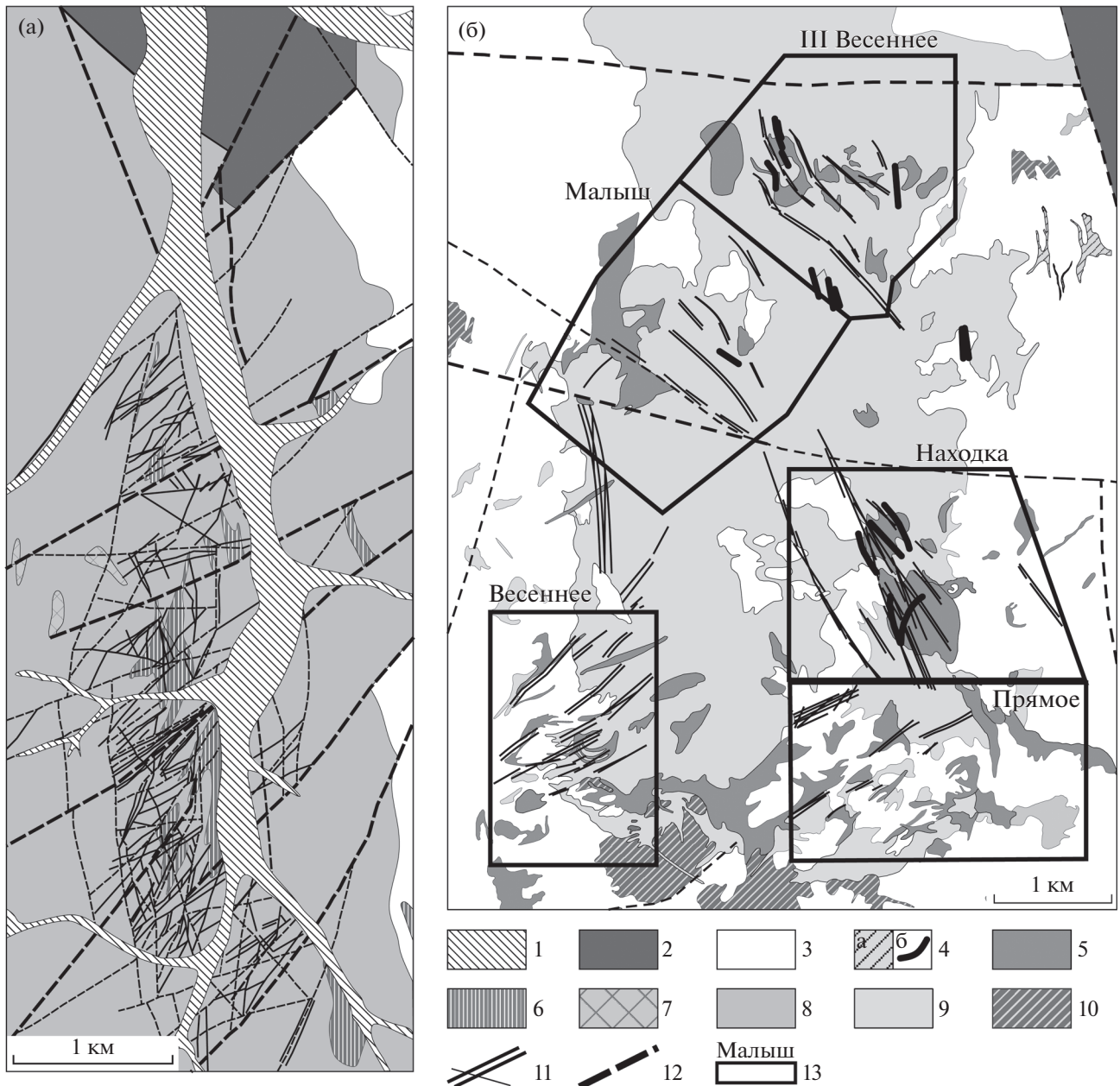
Преобладающим типом метасоматитов являются биотит-кварц-калишпатовые породы, рассеянные многочисленными зонами кварц-серицитового состава. Эти зоны, мощностью от 1 до 10 м, образуют мегаштокверк. Внешняя часть метасоматического ореола сложена пропилитами. Крайне редко на месторождении встречаются пострудные аргиллизиты.

Рудные тела представляют собой зоны прожилково-вкрапленных руд и штокверки кварцевых жил субмеридионального простирания, пересекающие кварц-серицитовые и биотит-кварц-калишпатовые метасоматиты. Рудные минералы образуют вкрапленность в биотит-кварц-калишпатовых и кварц-серицитовых метасоматитах, входят в состав жил и прожилков и выявлены в редких позднерудных гидротермальных брекчиях с кварц-сульфидным цементом. Главными рудными минералами являются пирит, борнит и халькопирит. Молибденит, содержащий 1000–2000 г/т Re, развит незначительно.

Поздними гипогенными образованиями являются кварц-карбонатные и флюоритовые прожилки и послерудные субгоризонтальные гипсангидритовые прожилки.

Пострудные прожилки концентрируются внутри пологопадающих к востоку (10°–30°) пластино- и линзообразных тел – штокверков, мощностью до нескольких десятков метров. Кулисно-лестничное расположение субгоризонтальной системы прожилков внутри штокверков (зон деформации) под острым углом к их ограничениям однозначно свидетельствуют о выполнении прожилками трещин субвертикального растяжения и отрыва, сформированных при надвигообразовании в механической обстановке простого сдвига. Направление растяжения в прожилках подчеркивается субвертикальной ориентировкой удлиненных кристаллов гипса. Надвиговые зоны не имеют ограничивающих сместителей и шовных зон с милонитами и катаклазитами, что указывает на раннюю стадию развития надвигов, когда в области их активного динамического влияния (распространения приразломных деформаций) формировались только трещины отрыва. К некоторым надвиговым зонам приурочены линзы “сухих” какиритов и мелкообломочных тектонических брекчий, не несущих никакой гидротермальной минерализации. По данным разведочного бурения, надвиговые зоны пересекают месторождение на разных глубинах и местами выходят на дневную поверхность.

Рудное поле Находка площадью 50 км² включает молибден-медно-порфировые проявления Находка, III Весенний, Малыш, месторождение Ве-



Фиг. 2. Схема геологического строения месторождения Песчанка (а) и рудного поля Находка (б). 1 – четвертичные отложения; 2 – нижнемеловые осадочные отложения; 3 – верхнеюрские вулканогенно-осадочные отложения; 4 – поздне-меловые субвулканические базальты: (а) штоки, силлы и (б) дайки; 5–8 – раннемеловой егдыгкычский интрузивный комплекс: 5 – кварцевые монцодиорит-порфиры, диорит-порфиры и кварцевые диорит-порфиры, 6 – монцодиорит-порфиры и кварцевые монцодиорит-порфиры, 7 – сиениты, 8 – монцодиориты; 9 – диорит-порфиры раннемелового Весеннинского интрузивного комплекса; 10 – позднеюрский габбро-диоритовый комплекс; 11 – тела кварц-серицитовых метасоматитов с рудоносными кварцевыми прожилками; 12 – тектонические нарушения, 13 – границы рудопроявлений.

сеннее и проявление Прямое (фиг. 26). На трех последних развита благороднометаллическая эпите-рмальная минерализация. Минеральные ресурсы рудного поля, предварительно оцененные в 2012 г. консалтинговой компанией IMC Montan, по категории Inferred в классификации JORC (запасы категории C1 + C2 – по отечественной классифика-

ции), составили: 3.1 млн т Cu, 50 тыс. т Mo, 390 т Au, 2163 т Ag (Читалин и др., 2013). Разведка рудного поля в настоящее время продолжается.

В геологическом строении рудного поля принимают участие верхнеюрские туфогенно-терригенные отложения, прорванные интрузивными телами баимского и егдыгкычского комплексов (фиг. 26).

Большая часть площади рудного поля занята интрузивом порфиroidных диоритов, которые относились ранее к позднеюрскому-раннемеловому весеннинскому комплексу. Наши данные свидетельствуют, что изотопный возраст циркона из этих пород составляет 142–143 млн лет (Бакшеев и др., 2014), что соответствует возрасту егдыкгычского комплекса. Выходы на поверхность интрузивных тел, сложенных кварцевыми монцодиорит-порфирами, диорит-порфиритами и кварцевыми диорит-порфиритами, относительно небольшие. Согласно работе (Котова и др., 2012), возраст этих пород составляет 139.6 ± 0.5 млн лет. В предыдущих публикациях (Шавкунов, 1973; Шаповалов, 1994) указывалось, что в пределах рудного поля развиты также и породы позднемелового омчакского комплекса. Однако данные об U/Pb возрасте циркона из интрузивных пород, относимых к омчакскому комплексу, свидетельствуют, что время их формирования совпадает с возрастом пород егдыкгычского комплекса (Котова и др., 2012) и, следовательно, они могут принадлежать последнему.

Вулканогенно-осадочная толща и интрузивы несогласно перекрываются отложениями нижнемеловой айнахкургенской свиты, сохранившейся лишь на северо-востоке рудного поля.

Позднемеловые пострудные дайки базальтов и андезитов, пересекающие все более ранние интрузивные тела, вулканогенно-осадочные и осадочные толщи, являются самыми молодыми в рудном поле (исключая четвертичные отложения).

Структура рудного поля определяется пострудными северо-западными и северо-восточными сдвигами и сбросо-сдвигами. Некоторые из них наследуют до- и синрудные нарушения.

В рудном поле Находка выделяются 5 типов метасоматических пород (от ранних к поздним): биотит-калишпат-кварцевые, пропициты (эпидот-хлорит-актинолитовые, хлоритовые), альбит-хлорит-кварц-мусковитовые, карбонат-турмалин-альбит-кварц-мусковитовые и кварц-иллитовые.

Рудные тела представлены изометричными и слабо вытянутыми в северо-западном направлении штокверковыми зонами кварцевых и кварц-карбонатных прожилков, размещенных в кварц-серицитовых метасоматитах и аргиллизитах. Основной объем рудной минерализации связан с кварц-серицитовыми породами, значительно реже рудные минералы образуют вкрапленность в биотит-кварц-калишпатовых метасоматитах, а в местах, где они установлены среди пропицитов, они приурочены к узким зонам филлизитов. Главными рудными минералами проявлений являются пирит, борнит и халькопирит. Молибденит, содержащий 20–1450 г/т Re, развит в основном на проявлении Малыш. На месторождении

Весеннее широко развиты галенит, сфалерит и блеклые руды. На проявлениях присутствует слабо выраженная зона вторичного сульфидного обогащения.

Рудное поле Омчак площадью 99 км², включающее проявления Правый Светлый и Вилка (не разведаны), приурочено к юго-восточному флангу пологой брахиантиклинали, сложенной верхнеюрскими вулкано-терригенными образованиями – андезитами, андезибазальтами, туфами, туфоконгломератами, туфопесчаниками, конгломератами, песчаниками, алевролитами и терригенными отложениями айнахкургенской свиты – конгломератами, гравелитами, крупнозернистыми песчаниками с прослоями алевролитов.

Интрузивные породы представлены диоритовыми порфиритами и монцодиоритами раннемелового егдыкгычского и гранодиорит-порфирами позднемелового омчакского комплексов. Диоритовые порфициты распространены в основном на северо-западе и юго-востоке рудного поля. На северо-востоке они слагают небольшие тела в Весеннинском поднятии, которые могут являться выведенными на поверхность фрагментами единого крупного массива. На юго-востоке группа небольших интрузивных тел диоритовых порфиритов приурочена к локальной антиклинали, ядерная часть которой сложена верхнеюрскими вулкано-терригенными образованиями.

В рудном поле развиты тектонические нарушения северо-западного, северо-восточного и субмеридионального направлений. Главную роль играет северо-западное направление, связанное с зоной Егдыкгычского глубинного разлома. Разрывные нарушения субмеридионального направления принадлежат к Алучинской зоне глубинного разлома и распространены на востоке участка. Северо-восточное направление представлено не протяженными разрывными нарушениями, вероятно, опережающими Алучинский или Егдыкгычский глубинные разломы.

В рудном поле выявлены следующие типы метасоматитов: эпидот-хлоритовые пропициты, кварц-серицитовые, кальцит-хлорит-калишпат-кварц-иллитовые и кварц-адуляр-кальцит-хлоритовые породы.

Рудные тела представлены штокверковыми зонами кварцевых прожилков с медной минерализацией в кварц-серицитовых метасоматитах и пропицитах. Кроме того, выявлены зоны кальцит-кварцевых прожилков с полиметаллической минерализацией, размещенные среди пропицитов и кальцит-хлорит-калишпат-кварц-иллитовых пород. Главными рудными минералами в штокверковых зонах являются пирит и халькопирит, а в кальцит-кварцевых прожилках – галенит и сфалерит.

МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

Оптические минералогические исследования выполнены на кафедре минералогии МГУ с помощью оптического микроскопа Axioplan фирмы Zeiss, снабженного цифровой фотокамерой и компьютером.

Изучение состава образцов проводили в лаборатории локальных методов исследования вещества геологического факультета МГУ при помощи сканирующего электронного микроскопа Jeol JSM-6480LV с энергодисперсионным спектрометром INCA-Energy 350 с Si—Li полупроводниковым детектором (аналитики Л.И. Марущенко, В.О. Япаскурт). Результаты обработаны с помощью программного обеспечения SEM Control User Interface, ver. 7.11 (Jeol Technics LTD) и INCA, ver. 17a (Oxford Instrument). Условия анализа: ускоряющее напряжение 20 кВ, ток зонда на образце 2 нА, локальность анализа 1–3 мкм. Порог обнаружения и относительная погрешность измерения составляли от 0.05 до 0.5 мас. % в зависимости от концентрации и энергии возбуждения спектральных линий, пики которых использовались для измерения. Абсолютная погрешность составляла для главных элементов до 1–2 отн. %, для элементов-примесей до 10 отн. %.

Для стандартизации использованы эталоны природных и синтетических сульфидов и теллуридов: сфалерит (S, Zn); Mn металлический (Mn); халькопирит (Fe, Cu); арсенопирит (As); сплав $Ag_{25}Au_{75}$ (Ag, Au); антимонит (Sb); PbTe (Te); PbSe (Se); Bi_2S_3 (Bi).

Химический состав самородного золота определяли при помощи электронного микрозонда Camebax SX-50, на кафедре минералогии геологического факультета МГУ (аналитик И.А. Брызгалов). Условия съемки: ускоряющее напряжение 15 кВ, ток зонда на образце 30 нА, локальность анализа 1–3 мкм. В качестве эталонов использованы: AuTe₂ (Au, Te); Cu (Cu); Ag₂Te (Ag). Порог обнаружения – 0.02%, ошибка измерений для основных компонентов составляла ±2 отн. %, для элементов-примесей значительно больше (~10 отн. %). Для процедуры коррекции использованы PAP-поправки.

Химический анализ керн скважин для геохимических исследований проводился в аккредитованной лаборатории “Стюарт Геокемикл энд Эссей”, г. Москва. Были проведены: 1) пробирный анализ с последующей атомно-эмиссионной спектрометрией с индуктивно-связанной плазмой (ICP-OES) на Pt, Pd, Au (нижний предел обнаружения 0.01 г/т); 2) спектрометрия ICP-OES после окислительного растворения проб в смеси кислот на 40 химических элементов (пределы обнаружения основных рудных и сопутствующих элементов (г/т): Ag – 0.5, As – 5, Bi – 5, Cd – 1, Cu – 1, Fe – 100, Mn – 1, Mo – 1, Pb – 2, Sb – 5, Se – 10, Te – 10, Zn – 1). В пробах с содержаниями более 1% меди проводилось ее по-

вторное определение с применением другой пробоподготовки: окислительного растворения с HBr и последующим ICP-OES-анализом. Точность определения концентраций элементов составила ± 5 отн. %. Систематические и случайные погрешности анализа по результатам внутрилабораторного контроля укладываются в диапазон $1.13 > \delta_{\text{сист}} > 0.84$ и $1.32 > \delta_{\text{случ}} > 1.0$.

Помимо результатов химического анализа использовалось минералогическое описание, проведенное геологами ЗАО “Сибгеоконсалтинг” при документации керна скважин, где каждый интервал был охарактеризован процентным содержанием сульфидов.

Для исследования флюидных включений из образцов руд с прозрачными минералами (кварцем, сфалеритом, флюоритом) были приготовлены пластинки толщиной 0.3–0.5 мм, отполированные с обеих сторон. Микротермометрическое изучение индивидуальных включений проводилось в лаборатории геологии рудных месторождений ИГЕМ РАН с использованием измерительного комплекса, состоящего из камеры THMSG 600 фирмы Linkam (Англия), установленной на микроскопе Olympus BX51 (Япония), видеокамеры и управляющего компьютера. Химический состав флюида, захваченного во включениях, оценивался по результатам измерений фазовых переходов и превращений, происходивших при нагревании и охлаждении препаратов. Точность измерений температуры составляет ±0.2°C в интервале температур от –20 до +20°C и понижается при более высоких и низких температурах. Состав солей, преобладающих в водных растворах флюидных включений, оценивался по результатам измерения температур плавления эвтектики (Борисенко, 1977). Суммарная концентрация солей оценивалась по температурам плавления льда на основе экспериментальных данных для системы NaCl–H₂O (Bodnar, Vityk, 1994). Давление углекислоты определялось для гетерогенных флюидов методом пересечения изохоры и изотермы (Калюжный, 1982). Общее давление оценивалось как сумма парциальных давлений углекислоты и насыщенного пара воды в гидротермальной системе (Прокофьев, 1998). Оценки концентраций солей, плотностей и давлений флюида проводились с использованием программы FLINCOR (Brown, 1989).

Анализ валового состава флюидов из флюидных включений из навесок 0.5 г мономинеральной фракции кварца размера 0.5–0.25 мм выполнен комплексом методов, включающим газовую и ионную хроматографию и ICP-MS, в ЦНИГРИ (аналитик – Ю.В. Васюта) по методике, опубликованной в работе (Кряжев и др., 2006).

МИНЕРАЛОГИЯ БЛАГОРОДНОМЕТАЛЬНЫХ РУД

На месторождениях и проявлениях Баимской зоны выявлены четыре типа рудной минерализации, содержащие минералы благородных металлов: 1) прожилково-вкрапленная халькопирит-борнит-кварцевая, 2) жильная доломит-кварц-полисульфидная, 3) жильная родохрозит-высокомарганцовистый доломит-кварц-полисульфидная и 4) кварц-кальцит-полисульфидная. Им соответствуют четыре типа ассоциаций с минералами благородных металлов.

Первый тип – халькопирит + борнит + кварц ассоциация с высокопробным самородным золотом в виде вростков в борните (рудоявление III Весеннее в рудном поле Находка), образующая прожилки и вкрапленность в биотит-калишпат-кварцевых и кварц-серицитовых метасоматитах, заместивших монзонитоиды егдыкычского комплекса. Высокое содержание золота установлено в борните месторождения Песчанка и проявления III Весенний. В большинстве образцов минералов-носителей золота не выявлено даже при электронно-микроскопических наблюдениях. Мы полагаем, что в этом случае золото находится в борните в виде мельчайших вростков.

Второй тип – низкомарганцовистый доломит + кварц + сульфиды (халькопирит, сфалерит, галенит, теннантит-тетраэдрит) ± турмалин ассоциация с низкопробным самородным золотом и гесситом (месторождение Песчанка, рудоявления Находка, III Весеннее и Прямое в рудном поле Находка), слагающая жилы и прожилки, которые локализованы в кварц-серицитовых метасоматитах и рассеяны прожилки с халькопиритом и борнитом.

Третий тип – родохрозит + высокомарганцовистый доломит + кварц + сульфиды (халькопирит, сфалерит, галенит, теннантит-тетраэдрит) ассоциация с низкопробным самородным золотом, электрум, акантитом, Ag и Au–Ag-теллуридами, и Ag-сульфосолями, образующая жилы и прожилки в высоко-Mn доломит-кварц-иллитовых метасоматитах (месторождение Весеннее и проявление Прямое в рудном поле Находка). Относительно высокое содержание золота зафиксировано на проявлении Прямое (рудное поле Находка) в участках, обогащенных мышьяковистым пиритом при ничтожном содержании других сульфидов. При этом мышьяковистый пирит, содержащий до 10.5 мас. % As, образует каймы вокруг безмышьяковистого пирита. Здесь собственные минеральные формы золота не были установлены, и предположительно золото находится в виде очень мелких включений в мышьяковистом пирите.

Четвертый тип – кальцит + кварц + сульфиды (халькопирит, сфалерит, галенит) ассоциация с низкопробным самородным золотом, сульфида-

ми и селенидами серебра и серебросодержащими сульфосолями. Минералы ассоциации слагают полисульфидные прожилки и вкрапленность в калишпат-кальцит-хлорит-кварцевых и кварц-иллитовых метасоматитах на рудоявлениях Правый Светлый и Вилка в рудном поле Омчак, рудоявление Малыш в рудном поле Находка.

Особенности морфологии и состава самородного золота и парагенных ему минералов определены для каждого из выделенных типов рудной минерализации.

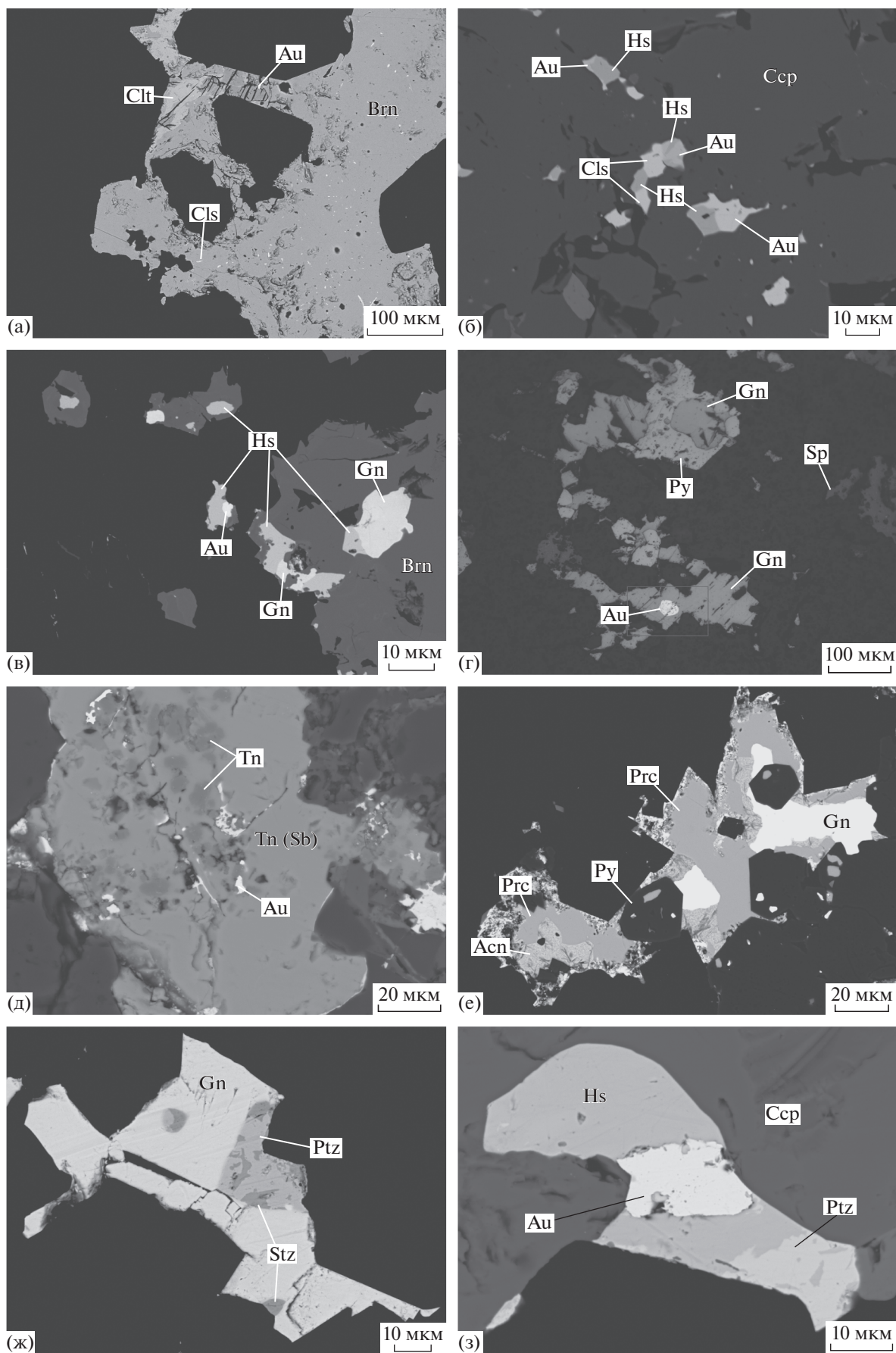
В ассоциации первого типа высокопробное *самородное золото* (917–926) установлено на проявлении III Весеннее в виде мелких включений (до 10 мкм) в борните совместно с клаусталитом (фиг. 3а). Кроме борнита и халькопирита, других сульфидных минералов в этой ассоциации не обнаружено.

В ассоциации второго типа в результате оптико-микроскопических исследований диагностировано только самородное золото; гессит выявлен при детальных электронно-микроскопических наблюдениях.

Самородное золото и *гессит* слагают выделения размером от нескольких единиц до нескольких десятков мкм, выполняя трещины в борните и халькопирите. Они образуют тесные срастания между собой и с клаусталитом (фиг. 3б, в). Пробность самородного золота, варьирующая от 868 до 878, ниже, чем в первом типе. Гессит иногда содержит небольшую примесь Cu (1.3–1.6 мас. %), что могло быть обусловлено захватом при анализе вмещающих сульфидов меди. Однако серы в составе гессита не обнаружено, что позволяет сделать вывод о вхождении Cu в структуру минерала.

В ассоциации третьего типа в результате оптико-микроскопических исследований диагностировано только самородное золото, остальные минералы, выявленные при детальных электронно-микроскопических наблюдениях, представлены гесситом, петцитом, штютцитом, пирсеитом, акантитом. Они развиты в виде мелких вростков (2–30 мкм) или микропрожилков в ранних сульфидных, реже обнаруживаются среди жильных кварца и карбонатов.

Самородное золото (пробность 756–857) и *электрум* (657–743) образуют вростки в пирите, галените (фиг. 3г), блеклых рудах (фиг. 3д), тесно срастаются с гесситом, петцитом (фиг. 3б, з). Размер выделений варьирует от 2 до 30 мкм. Индивидуальные золотины слабозональные: краевые зоны характеризуются более низкой пробностью. Анализ фондовой литературы показывает, что пробность золота в отработанных в настоящее время россыпях в пределах рудного поля Находка совпадает с определенной нами в первичных рудах, что позволяет предполагать формирование россыпей за счет эрозии этих руд.



Фиг. 3. благороднометаллическая минерализация первого, второго и третьего типов. а – первый тип, вросстки самородного золота в борните; б, в – второй тип: б – срастание самородного золота, гессита и клаусталита, в – срастание галенита, самородного золота и гессита; г–ж – третий тип: г – вроссток самородного золота в галените, д – самородное золото в трещине в теннантите, е – обрастание галенита пирсеитом и замещение последнего акантитом, ж – срастание галенита и петцита и замещение последнего штюцитом; з – срастание самородного золота, петцита и гессита. а, б – проявление III Весеннее, в – месторождение Песчанка; г–з – месторождение Весеннее. а–в, д–з – фото в отраженных электронах; г – фото в отраженном свете, николи параллельны. Au – самородное золото, Asp – акантит, Bgn – борнит, Csp – халькопирит, Cls – клаусталит, Clt – халькозин, Gn – галенит, Hs – гессит, Nm – науманнит, Pcs – пирсеит, Ptz – петцит, Py – пирит, Sp – сфалерит, Stz – штюцит, Tn (Sb) и Tn – теннантит с большим и меньшим содержанием Sb соответственно.

Гессит является самым распространенным минералом теллура. Он представлен вростками в ранних галените, халькопирите и образует срастания с петцитом, теннантитом и самородным золотом (фиг. 3б). По данным электронно-зондовых исследований, гессит месторождения Весеннее содержит небольшую примесь Cu (до 1.7 мас. %), Fe (до 0.4 мас. %), As (до 0.5 мас. %), Au (до 0.6 мас. %) (табл. 1, анализ 1–8). Сера в анализах зерен гессита не обнаружена, что предполагает вхождение Cu, Fe, As в состав минерала.

Петцит, штюцит, пирсеит, акантит развиты в рудах незначительно.

Петцит. Электронно-микроскопические наблюдения свидетельствуют, что гессит и петцит об-

разуют тесные срастания (фиг. 3з). В результате электронно-зондового анализа в минерале выявлена примесь Fe (до 0.2 мас. %) и Cu (до 0.4 мас. %) (табл. 1, анализ 9–11), которые, как и в случае с гесситом, входят в состав минерала, а не являются элементами сульфидов, захваченных при анализе, что согласуется с литературными данными о вхождении Fe и Cu в структуру минерала (Чвилёва и др., 1988).

Штюцит замещает образовавшийся ранее петцит (фиг. 3ж). Максимальный размер выделений минерала достигает 10 мкм. Электронно-зондовый анализ показывает, что штюцит содержит незначительную примесь Au (1.0 мас. %) (табл. 1, анализ 12), которая, скорее всего, обусловлена тонкими реликтами замещаемого петцита.

Таблица 1. Химический состав (мас. %) минералов серебра, рудное поле Находка

Компонент	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15
Ag	63.05	63.67	60.69	63.58	63.03	62.63	62.10	60.04	43.18	42.11	42.40	58.69	66.61	63.26	81.84
Au	Н.п.о.	Н.п.о.	Н.п.о.	Н.п.о.	Н.п.о.	Н.п.о.	0.61	Н.п.о.	24.16	24.07	24.82	1.01	Н.п.о.	Н.п.о.	Н.п.о.
Te	36.51	36.31	37.49	36.14	35.92	36.64	37.10	40.16	32.06	32.19	32.46	41.22	Н.п.о.	0.36	Н.п.о.
As	Н.п.о.	Н.п.о.	Н.п.о.	Н.п.о.	0.53	Н.п.о.	Н.п.о.	Н.п.о.	Н.п.о.	Н.п.о.	Н.п.о.	Н.п.о.	6.09	5.73	Н.п.о.
Sb	Н.п.о.	Н.п.о.	Н.п.о.	Н.п.о.	Н.п.о.	Н.п.о.	Н.п.о.	Н.п.о.	Н.п.о.	Н.п.о.	Н.п.о.	Н.п.о.	1.16	1.34	Н.п.о.
Fe	Н.п.о.	Н.п.о.	Н.п.о.	0.35	Н.п.о.	0.37	Н.п.о.	Н.п.о.	Н.п.о.	0.20	Н.п.о.	Н.п.о.	0.21	1.47	Н.п.о.
Cu	Н.п.о.	Н.п.о.	1.74	0.49	0.20	Н.п.о.	Н.п.о.	Н.п.о.	Н.п.о.	0.40	Н.п.о.	Н.п.о.	9.67	11.54	2.62
S	Н.п.о.	Н.п.о.	Н.п.о.	Н.п.о.	Н.п.о.	Н.п.о.	Н.п.о.	Н.п.о.	Н.п.о.	Н.п.о.	Н.п.о.	Н.п.о.	16.18	16.57	15.68
Сумма	99.57	99.98	99.91	100.57	99.67	99.64	99.80	100.20	99.41	98.97	99.68	100.92	99.93	100.26	100.13

Формульные коэффициенты в расчете на

	3 атома							6 атомов			8 атомов	29 атомов		3 атома	
Ag	2.014	2.024	1.910	1.994	2.001	1.992	1.986	1.916	3.102	3.023	3.049	4.990	13.080	12.137	1.766
Au							0.011		0.951	0.947	0.977	0.047			
Te	0.986	0.976	0.997	0.958	0.964	0.985	1.003	1.084	1.947	1.954	1.974	2.963		0.058	
As					0.024								1.722	1.582	
Sb													0.203	0.228	
Fe				0.021		0.023					0.028		0.081	0.543	
Cu			0.093	0.026	0.011						0.048		3.223	3.759	0.096
S													10.691	10.693	1.138

Примечание. 1–2 – проявление Малыш, 3–15 – месторождение Весеннее. 1–8 – гессит, 9–11 – петцит, 12 – штюцит; 13, 14 – пирсеит; 15 – акантит. Н.п.о. – ниже предела обнаружения.

Таблица 2. Химический состав (мас. %) минералов серебра, рудное поле Омчак

Компонент	1	2	3	4	5	6	7	8	9
Ag	73.88	75.71	58.02	58.21	62.20	61.70	62.30	74.94	76.42
Cu	2.24	1.27	14.62	13.87	11.68	12.24	11.72	1.28	1.61
Fe	0.57	0.93	1.06	0.63	Н.п.о.	1.16	Н.п.о.	Н.п.о.	Н.п.о.
As	Н.п.о.	Н.п.о.	5.86	5.70	6.16	5.09	6.17	3.26	4.31
Sb	Н.п.о.	Н.п.о.	1.56	1.99	Н.п.о.	Н.п.о.	Н.п.о.	3.96	3.61
Te	0.52	0.97	Н.п.о.	Н.п.о.	Н.п.о.	Н.п.о.	0.27	Н.п.о.	Н.п.о.
S	3.36	4.85	14.59	14.62	14.66	14.41	14.55	14.66	15.23
Se	18.60	14.77	4.34	4.60	3.58	4.22	3.44	Н.п.о.	Н.п.о.
Сумма	99.17	98.50	100.05	99.62	98.28	98.82	98.45	98.10	101.18

Формульные коэффициенты в расчете на

	3 атома		29 атомов						
Ag	1.912	1.942	11.238	11.373	12.431	12.230	12.464	16.142	15.853
Cu	0.098	0.055	4.805	4.601	3.964	4.119	3.981	0.467	0.568
Fe	0.028	0.046	0.397	0.237		0.443			
As			1.634	1.604	1.773	1.454	1.776	1.012	1.287
Sb			0.268	0.345					
Te	0.011	0.021					0.045		
S	0.293	0.418	9.510	9.613	9.856	9.610	9.794	10.623	10.629
Se	0.657	0.517	1.147	1.227	0.976	1.144	0.939		

Примечание. 1–7 – проявление Вилка, 8, 9 – проявление Правый Светлый. 1, 2 – науманнит, 3–7 – селенистый пирсеит; 8, 9 – арсенополибазит. Н.п.о. – ниже предела обнаружения.

Пирсеит образует каймы толщиной до 10 мкм вокруг кристаллов галенита (фиг. 3з), что обусловлено замещением ранее образованного теннангита, который часто обрастает галенит. Замещение теннангита происходит в результате воздействия более поздних серебросодержащих растворов. Минерал содержит небольшую примесь Fe (до 1.5 мас. %), Sb (до 1.3 мас. %) и Te (0.4 мас. %) (табл. 1, анал. 13, 14).

Акантит замещает пирсеит (фиг. 3е), что подтверждается обнаружением в составе минерала Cu (2.6 мас. %) (табл. 1, анал. 15).

Минералы ассоциации четвертого типа представлены низкопробным самородным золотом, науманнитом, селенистым пирсеитом, арсенополибазитом, акантитом, курилитом, фазами Pb–Ag–Bi–Te–Se, Ag–Te–Se и Ag–Bi–Se.

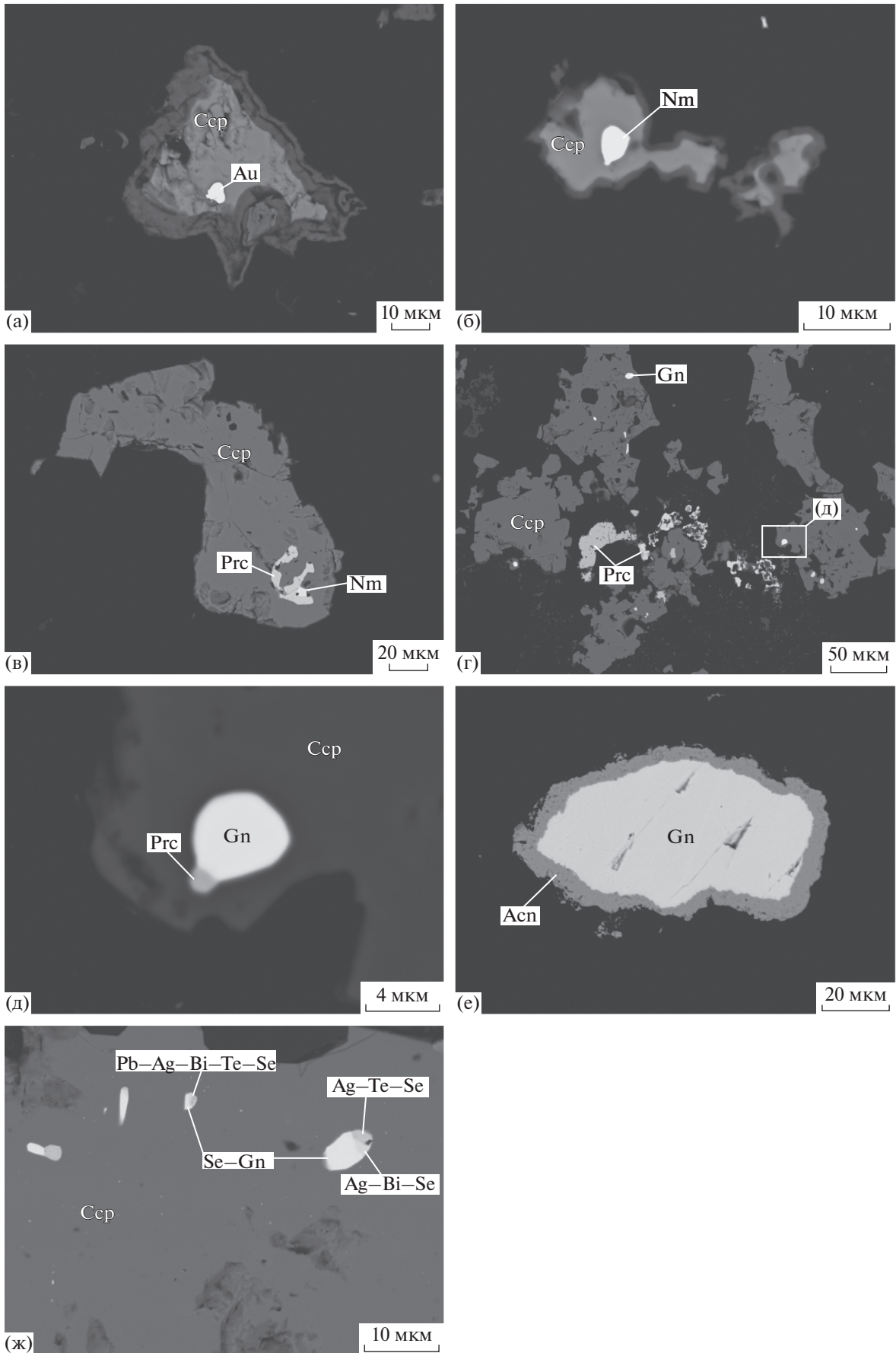
Самородное золото слагает мелкие (до 10 мкм) вроски в халькопирите (фиг. 4а). Его пробность 784–800 близка к пробности самородного золота

в россыпи, обрабатываемой на ручье Правый Светлый в настоящее время.

Науманнит представлен изолированными вросками размером до 10 мкм в халькопирите (фиг. 4б) и образует тесные сростания с селенистым пирсеитом (фиг. 4в). Минерал содержит небольшую примесь Cu, Fe, S и Te (табл. 2, анал. 1, 2). Однако возможно, что первые три элемента были захвачены при анализе из вмещающего халькопирита. Содержание Te 0.5–1.0 мас. % (табл. 2, анал. 1, 2). Это первая находка науманнита в пределах Баимской зоны.

Селенистый пирсеит слагает выделения размером до нескольких десятков микронов в кварце (фиг. 4г) и мелкие вроски в халькопирите в тесном сростании с селенсодержащим галенитом (фиг. 4д). Минерал содержит примесь Fe (до 1.2 мас. %), Sb (до 2 мас. %) и Te (до 0.3 мас. %) (табл. 2, анал. 3–7). Главным отличием от пирсеита месторождения Весеннее в рудном поле На-

Фиг. 4. Благороднометаллическая минерализация четвертого типа. а – вросок самородного золота в халькопирите; б – вросок науманнита в халькопирите; в – агрегат науманнита и селенистого пирсеита в халькопирите; г – изолированное выделение пирсеита; д – сростание селенистых пирсеита и галенита в халькопирите, увеличенный фрагмент (г); е – кайма нарастания акантита на галените; ж – фазы Pb–Ag–Bi–Te–Se, Ag–Te–Se и Ag–Bi–Se в сростании с селенистым галенитом в халькопирите. а, е – проявление Правый Светлый, б–д – проявление Вилка, ж – проявление Малыш. Все фото в отраженных электронах. Обозначения минералов см. на фиг. 3.



ходка является повышенное содержание Se 0.94–1.15 ф.к.

Арсенополибазит установлен в тонких кварцевых прожилках, рассекающих адуляр-кальцит-хлоритовые метасоматиты на проявлении Правый Светлый. Размер зерен минерала не превышает нескольких десятков микронов. Минерал содержит небольшую примесь Cu (0.47–0.57 ф.к.) (табл. 2, anal. 8, 9).

Акантит обнаружен на проявлении Правый Светлый в виде мелких (первые десятки микронов) выделений в кварце и тонкой каймы на галените (фиг. 4е). В отличие от медьсодержащего акантита месторождения Весеннее в рудном поле Находка, в описываемом акантите примесей не обнаружено. Его состав (мас. %): 86.44 Ag, 10.37 S, сумма 96.81; формула $Ag_{2.137}S_{0.863}$.

Редкий минерал *курулит* был диагностирован нами на проявлении Малыш только по результатам микрорентгеноспектрального анализа. Химический состав минерала (мас. %): Pb 0.11, Ag 67.58, Te 25.47, Se 5.41, S 0.57, сумма 99.15; формула в расчете на 12 атомов $Ag_{8.234}(Te_{2.624}Pb_{0.007})_{2.631}(Se_{0.900}S_{0.235})_{1.135}$. Впервые курулит был описан в Au–Ag-рудах Правосоловского месторождения на Курилах в ассоциации с тетраэдритом, сильванитом, петцитом и гесситом (Kovalenker *et al.*, 2010).

Фазы Pb–Ag–Bi–Te–Se, Ag–Te–Se и Ag–Bi–Se в ассоциации с селенистым галенитом до класталита установлены в виде тонких вростков в халькопирите (фиг. 4ж) на проявлении Малыш. Размер вростков не превышает несколько микронов, поэтому провести количественный анализ фаз не представилось возможным.

ИССЛЕДОВАНИЕ ФЛЮИДНЫХ ВКЛЮЧЕНИЙ

Изготовление большого числа прозрачно-полированных пластин и их изучение позволило выбрать пригодные для исследований первичные флюидные включения размером более 15 мкм в кварце, сфалерите и флюорите. Изучено 22 образца из жил и прожилков месторождений и рудопроявлений Баимской зоны, представляющих разные типы минеральных ассоциаций. Среди изученных флюидных включений в соответствии с известными критериями (Реддер, 1987) были выделены первичные, первично-вторичные и вторичные флюидные включения. К первичным отнесены флюидные включения, равномерно распределенные в объеме минерала-хозяина, либо приуроченные к зонам роста. Вторичными считались включения, приуроченные к секущим минерал-хозяин трещинам. Первично-вторичные флюидные включения приурочены к трещинам, не достигающим внешних границ кристал-

лов и зерен, а по фазовому наполнению аналогичны первичным включениям.

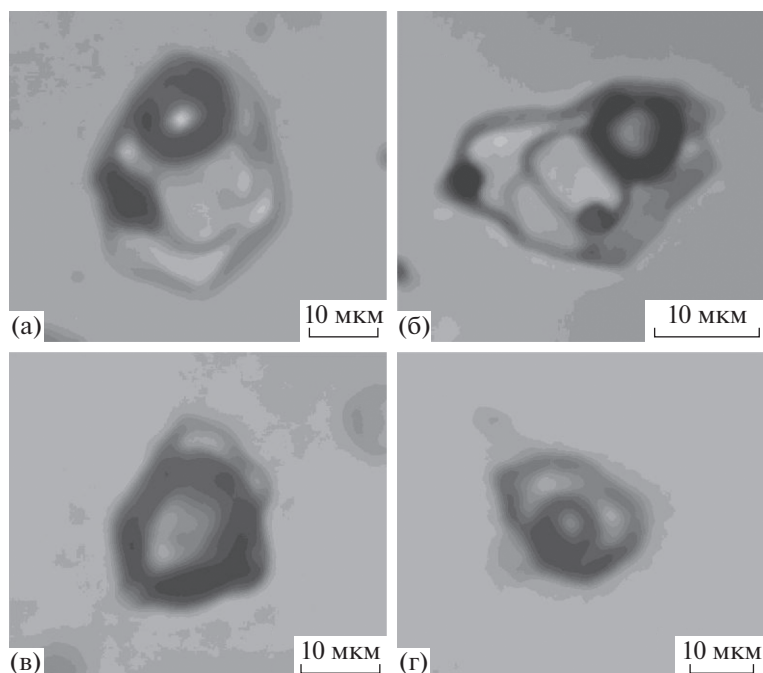
В кварце встречаются три типа флюидных включений (фиг. 5): 1) включения хлоридных рассолов, содержащие газовый пузырек, водный раствор, один или несколько изотропных кристаллов, пластинчатый гематит красного цвета и непрозрачный рудный минерал (халькопирит или магнетит); 2) существенно газовые включения, содержащие газ с небольшой каймой водного раствора; 3) двухфазовые газовой-жидкие включения водно-солевых растворов. Во флюорите и сфалерите обнаружены только включения третьего типа.

Результаты термо- и криометрических исследований более 400 индивидуальных флюидных включений в кварце, флюорите и сфалерите разных месторождений и рудопроявлений Баимской зоны суммированы в табл. 3 и на фиг. 6.

Рудообразующие флюиды Баимской площади в целом содержали хлориды Na и K. Об этом свидетельствуют эвтектики растворов включений (от –50 до –21 °С). В многофазовых включениях установлен дочерний галит, который диагностирован по близости показателя преломления кубического дочернего кристалла к кварцу и переходу в гидрогалит при замораживании раствора включений (обратный переход в галит происходит при 0.0–0.5 °С). Параметры флюида различных типов минерализации на месторождениях и проявлениях Баимской рудной зоны отличаются. Среди них можно выделить высокотемпературную прожилково-вкрапленную минерализацию порфирирового типа, средне- и низкотемпературную гидротермальную минерализацию.

Прожилково-вкрапленная халькопирит-борнит-кварцевая минерализация изучена на месторождении Песчанка и проявлениях III Весеннее, Малыш и Правый Светлый. Диапазон изменения температур и концентраций солей для этих флюидов представлен на фиг. 6а. В кварце минерализации этого типа встречаются все три типа флюидных включений.

Полная гомогенизация включений рассолов (тип 1) в кварце (при растворении всех дочерних фаз) достигается при температурах 594–301 °С, концентрация солей составляет 73.1–32.2 мас. %-экв. NaCl. Плотность флюида 0.97–1.36 г/см³. Существенно газовые флюидные включения (тип 2), сингенетичные высокотемпературным включениям хлоридных рассолов, содержат мало плотный водяной пар и небольшое количество водного флюида с концентрацией солей 21.5–2.4 мас. %-экв. NaCl. Они гомогенизируются в газ в диапазоне температур 594–381 °С. В некоторых включениях при глубоком охлаждении вымораживается кристалл углекислоты, исчезающий при температуре выше –100 °С. Давление насыщенного пара



Фиг. 5. Типы флюидных включений в кварце рудных прожилков месторождений и рудопроявлений Баимской зоны: многофазовые включения высокотемпературных хлоридных рассолов (а, б), содержащие водный раствор, газ, кубические кристаллы хлоридов и рудные минералы (халькопирит (?), гематит); преимущественно газовые включения (в) и двухфазовые газовой-жидкие (г) флюидные включения.

воды составляло 1200–220 бар. Двухфазовые (тип 3) газовой-жидкие флюидные включения в кварце гомогенизируются в жидкость при температурах 460–106°C; концентрация солей составляет 18.4–0.9 мас. %-экв. NaCl; плотность флюида варьирует от 0.63 до 1.01 г/см³.

Состав растворов флюидных включений в кварце прожилково-вкрапленной халькопирит-борнит-кварцевой минерализации месторождения Песчанка и рудопроявления Малыш приведен в табл. 4 и на фиг. 7а. Во флюиде среди катионов главную роль играют Na и K, а Ca и Mg находятся в подчиненном количестве. Установлены заметные количества таких компонентов, как Cl⁻, HCO₃⁻, CO₂ и CH₄, As и В. Кроме того, в составе флюида выявлены: Br, Li, Rb, Cs, Sr, Mo, Sb, Zn, Cd, Bi, Ga, Ge, Sc, Mn, Fe, Co, Ni, Cr, Sn, Ba, W, Hg, Tl и REE. Отношение K/Rb изменяется в пределах 186–284.

Жильная доломит-кварц-полисульфидная минерализация изучена на месторождении Песчанка и проявлениях Находка и Прямое. Диапазон изменения температур и концентраций солей для этих флюидов представлен на фиг. 6б. В кварце минерализации этого типа установлены все три типа флюидных включений.

Включения рассолов типа 1 в кварце гомогенизируются при температурах 581–315°C, а концентрация солей составляет 53.5–39.4 мас. %-экв. NaCl. Плотность флюида 0.99–1.14 г/см³. Существенно га-

зовые флюидные включения (тип 2), сингенетичные высокотемпературным включениям хлоридных рассолов и двухфазовым газовой-жидким включениям (тип 3), содержат малоплотный водяной пар и небольшое количество водного флюида с концентрацией солей 10.7–4.7 мас. %-экв. NaCl. Они гомогенизируются в газ в диапазоне температур 540–402°C. Давление насыщенного пара воды составляет 850–280 бар. Двухфазовые (тип 3) газовой-жидкие флюидные включения в кварце гомогенизируются в жидкость при температурах 418–104°C, концентрация солей составляет 11.1–0.2 мас. %-экв. NaCl. Плотность флюида 0.61–0.97 г/см³.

Проведенные исследования химического состава флюида (табл. 4, фиг. 7б) показали, что во флюиде среди катионов главную роль играют Na и K, а Ca и Mg находятся в подчиненном количестве. Установлены заметные количества таких компонентов, как Cl⁻, HCO₃⁻, CO₂, CH₄, As (2.8 г/л, что является максимальной концентрацией этого элемента для рудного поля) и В. Кроме микроэлементов, обнаруженных в составе флюида прожилково-вкрапленной халькопирит-борнит-кварцевой минерализации (Br, Li, Rb, Cs, Sr, Mo, Sb, Zn, Cd, Bi, Ga, Ge, Sc, Mn, Fe, Co, Ni, Cr, Sn, Ba, W, Hg, Tl и REE), здесь присутствуют Ag, Pb, Th, Ti, V и Zr. Отношение K/Rb составляет 426–2405.

Таблица 3. Результаты термо- и криометрических исследований индивидуальных флюидных включений в минералах разных типов оруденения месторождений и проявлений Баимской рудной зоны

№ пробы	Тип включений*	<i>n</i>	$T_{\text{гом}}, ^\circ\text{C}$	$T_{\text{эвт}}, ^\circ\text{C}$	$T_{\text{пл. льда}}, ^\circ\text{C}$	$T_{\text{пл. CO}_2}, ^\circ\text{C}$	C, мас. %-экв. NaCl	$d, \text{г/см}^3$	$P, \text{бар}$
Прожилково-вкрапленная халькопирит-борнит-кварцевая минерализация									
Песчанка (кварц)									
СП10 282/35.6	1, П	4	506	Не опр.	(442)	—	52.3	1.11	—
	1, П	6	414	Не опр.	(497)	—	49.0	1.09	—
	1, П	3	436	Не опр.	(485)	—	51.6	1.10	—
	1, П	5	226	Не опр.	(464)	—	55.0	1.36	—
	1, П	3	364	Не опр.	(454)	—	53.8	1.21	—
	1, П	8	256	Не опр.	(448)	—	53.0	1.29	—
	2, П	4	447 Г	Не опр.	-5.0	—	7.9	Не опр.	420
	2, П	7	439 Г	Не опр.	-1.4	-100 В*	2.4	Не опр.	390
	2, П	6	430 Г	Не опр.	-3.8	—	6.2	Не опр.	360
	2, П	3	424 Г	Не опр.	-3.4	—	5.5	Не опр.	340
	2, П	3	406 Г	Не опр.	-2.1	—	3.5	Не опр.	290
	1, П	5	439	Не опр.	(411)	—	48.7	1.09	—
	1, П	5	255	Не опр.	(405)	—	48.0	1.24	—
	1, П	11	267	Не опр.	(374)	—	44.7	1.19	—
DHP13-297/795.3	3, П-В	4	280	-22	-4.7	—	7.5	0.83	—
	3, В	3	117	-21	-1.8	—	3.1	0.97	—
	1, П	2	349	-55	(469)	—	55.7	1.25	—
	1, П	5	304	-55	(425)	—	50.3	1.22	—
	1, П	3	273	-55	(387)	—	46.1	1.20	—
	1, П-В	3	311	-56	(365)	—	43.8	1.14	—
	1, П-В	8	313	-56	(206)	—	32.2	1.02	—
	2, П	3	479 Г	-40	-18.7	—	21.5	Не опр.	540
	2, П	2	435 Г	-51	-8.8	—	12.6	Не опр.	370
	2, П-В	2	381 Г	-33	-3.7	—	5.9	Не опр.	220
	3, П	3	367	-37	-6.2	—	9.5	0.71	—
	3, П	2	348	-31	-4.6	—	7.3	0.71	—
	3, П-В	2	316	-30	-2.5	—	4.1	0.72	—
	3, В	3	113	-33	-0.6	—	1.0	0.96	—
III Весеннее (кварц)									
7732-8122	3, П	3	330	-26	-0.6	—	1.1	0.63	—
	3, П-В	3	257	-24	-0.5	—	0.9	0.79	—
	3, В	2	119	-24	-0.5	—	0.9	0.95	—
Мальш (кварц)									
7985-5050	1, П	2	545	-38	(362)	—	43.5	1.08	—
	1, П	3	305	Не опр.	(396)	—	47.0	1.09	—
	3, П	2	318	-30	-6.1	—	9.3	0.79	—
7623-038	3, 2, П	3	460	-55	-14.7	—	18.4	0.69	470
	3, 2, П	4	401	-57	-11.8	—	15.8	0.75	270
	3, П-В	6	375	-28	-1.6	—	2.6	0.55	—

Таблица 3. Продолжение

№ пробы	Тип включений*	<i>n</i>	$T_{\text{гом}}, ^\circ\text{C}$	$T_{\text{эвт}}, ^\circ\text{C}$	$T_{\text{пл. льда}}, ^\circ\text{C}$	$T_{\text{пл CO}_2}, ^\circ\text{C}$	C, мас. %-экв. NaCl	$d, \text{г/см}^3$	$P, \text{бар}$
	3, П-В	3	290	–28	–1.6	–	2.6	0.75	–
Правый Светлый (кварц)									
6620-8701/1	1, 2, П	3	558	–50	(594)	–	73.1	1.35	1200
	1, 2, П	4	488	–53	(376)	–	44.9	0.97	580
	1, П-В	3	59	–55	(301)	–	38.2	1.26	–
	3, В	3	159	–28	–2.7	–	4.4	0.94	–
	3, В	4	145	–29	–2.1	–	3.4	0.95	–
	3, В	5	139	–28	–7.3	–	10.9	1.01	–
	3, В	3	106	–31	–2.5	–	4.1	0.98	–
Жильная доломит-кварц-полисульфидная минерализация									
Песчанка (кварц)									
8295-757	3, П	2	293	–32	–4.2	–	6.7	0.80	–
	3, П	2	292	–28	–0.9	–	1.6	0.73	–
	3, П	2	288	–30	–0.7	–	1.2	0.73	–
	3, П-В	4	265	–28	–0.2	–	0.4	0.77	–
	3, П-В	2	215	–29	–0.4	–	0.7	0.85	–
	3, П-В	3	160	–29	–0.2	–	0.4	0.92	–
Песчанка (флюорит)									
СП10 230-65.6	3, П	2	265	–30	–0.1	–	0.2	0.76	–
	3, П	4	244	–32	–0.6	–	1.1	0.78	–
	3, П	9	198	–31	–0.5	–	0.9	0.88	–
	3, В	3	159	–24	–0.2	–	0.4	0.92	–
	3, В	2	129	–34	–1.8	–	3.1	0.96	–
	3, В	3	128	–22	–0.2	–	0.4	0.94	–
	3, В	2	104	–21	–0.2	–	0.4	0.96	–
Находка (кварц)									
СН11 540-542.5	1, П	4	581	Не опр.	(452)	–	53.5	0.99	–
	2, П	2	540 Г	–23	–5.9	–	9.1	Не опр.	850
	1, П	3	362	–47	(485)	–	57.8	1.14	–
	1, П	2	298	–50	(485)	–	57.8	1.14	–
	2, П	2	460 Г	–25	–7.2	–	10.7	Не опр.	470
	1, П	2	309	–48	(430)	–	50.8	1.10	–
	2, П	3	402 Г	–23	–2.8	–	4.7	Не опр.	280
	3, П	2	346	–21	–1.2	–	2.1	0.61	–
	3, П-В	3	264	–25	–1.5	–	2.6	0.80	–
	3, В	3	130	–26	–3.1	–	5.1	0.97	–
	3, В	3	122	–26	–2.9	–	4.8	0.98	–
Прямое (кварц)									
7231-8125-2	1, П	2	250	–55	(418)	–	49.5	1.10	–
	3, П	3	362	–37	–2.4	–	4.0	0.61	–
	3, П-В	3	261	–32	–6.5	–	9.9	0.88	–

Таблица 3. Продолжение

№ пробы	Тип включений*	<i>n</i>	$T_{\text{гом}}, ^\circ\text{C}$	$T_{\text{эвт}}, ^\circ\text{C}$	$T_{\text{пл. льда}}, ^\circ\text{C}$	$T_{\text{пл CO}_2}, ^\circ\text{C}$	С, мас. %-экв. NaCl	$d, \text{г/см}^3$	$P, \text{бар}$
7246-8266	3, П	3	418	-36	-7.5	—	11.1	0.63	—
	3, П	2	391	-46	-16.3	—	19.7	0.82	—
	1, П	4	202	He опр.	(315)	—	39.4	1.09	—
	3, П-В	7	285	-31	-2.4	—	4.0	0.78	—
	3, П-В	3	253	-28	-0.6	—	1.1	0.80	—
	3, В	2	233	-26	-0.5	—	0.9	0.83	—
	3, В	6	158	-26	-0.4	—	0.7	0.92	—
Жильная родохрозит-высокомарганцевый доломит-кварц-полисульфидная минерализация									
Весеннее (кварц)									
7303-8000-2	3, 2, П*	3	404	-58	-23.8	—	22.9	0.83	280
	3, 2, П*	2	402	-37	-10.8	—	14.8	0.73	280
	3, П	3	380	-55	-7.3	—	10.9	0.70	—
	3, П-В	5	259	-32	-2.3	—	3.8	0.82	—
Весеннее (сфалерит)									
СН11 721-138.6 СН11 721-364.5	3, П	12	168	-31	-2.6	—	4.3	0.93	—
	3, П	6	275	-32	-3.9	—	6.3	0.82	—
	3, П	2	214	-34	-1.7	—	2.9	0.87	—
	3, П	7	211	-34	-2.1	—	3.6	0.88	—
	3, П	5	203	-29	-0.7	—	1.2	0.87	—
	3, П	19	197	-34	-2.5	—	4.2	0.90	—
	3, П	2	156	-24	-2.5	—	4.2	0.94	—
Прямое (кварц)									
7240-818	2, П	2	395 Г	-24	-1.6	—	2.7	He опр.	260
	3, П	2	309	-31	-4.1	—	6.6	0.77	—
	1, П	3	298	-37	(289)	—	37.4	1.08	—
	3, П	2	296	-33	-5.4	—	8.4	0.82	—
	3, П	3	270	-21	-2.5	—	4.2	0.81	—
	3, П-В	2	257	-35	-6.6	—	10.0	0.89	—
Жильная кварц-кальцит-полисульфидная минерализация									
Правый Светлый (кварц)									
6894-8724	2, П	2	400 Г	-27	-5.1	—	8.0	He опр.	270
	3, П	3	389	-35	-3.5	—	5.6	0.57	—
	3, П	3	383	-23	-0.9	—	1.5	0.49	—
	3, П	3	307	-30	-6.1	—	9.3	0.81	—
	3, П	5	301	-34	-3.6	—	5.8	0.77	—
	1, П	3	296	-59	(284)	—	37.0	1.09	—
	3, В	4	130	-33	-2.9	—	4.7	0.97	—
	3, В	2	128	-44	-13.3	—	17.2	1.06	—
	Вилка (кварц)								
7065-9149	3, 2 П	3	362	-29	-0.3	—	0.5	0.53	180
	3, 2 П	7	356	-28	-0.3	—	0.5	0.55	170

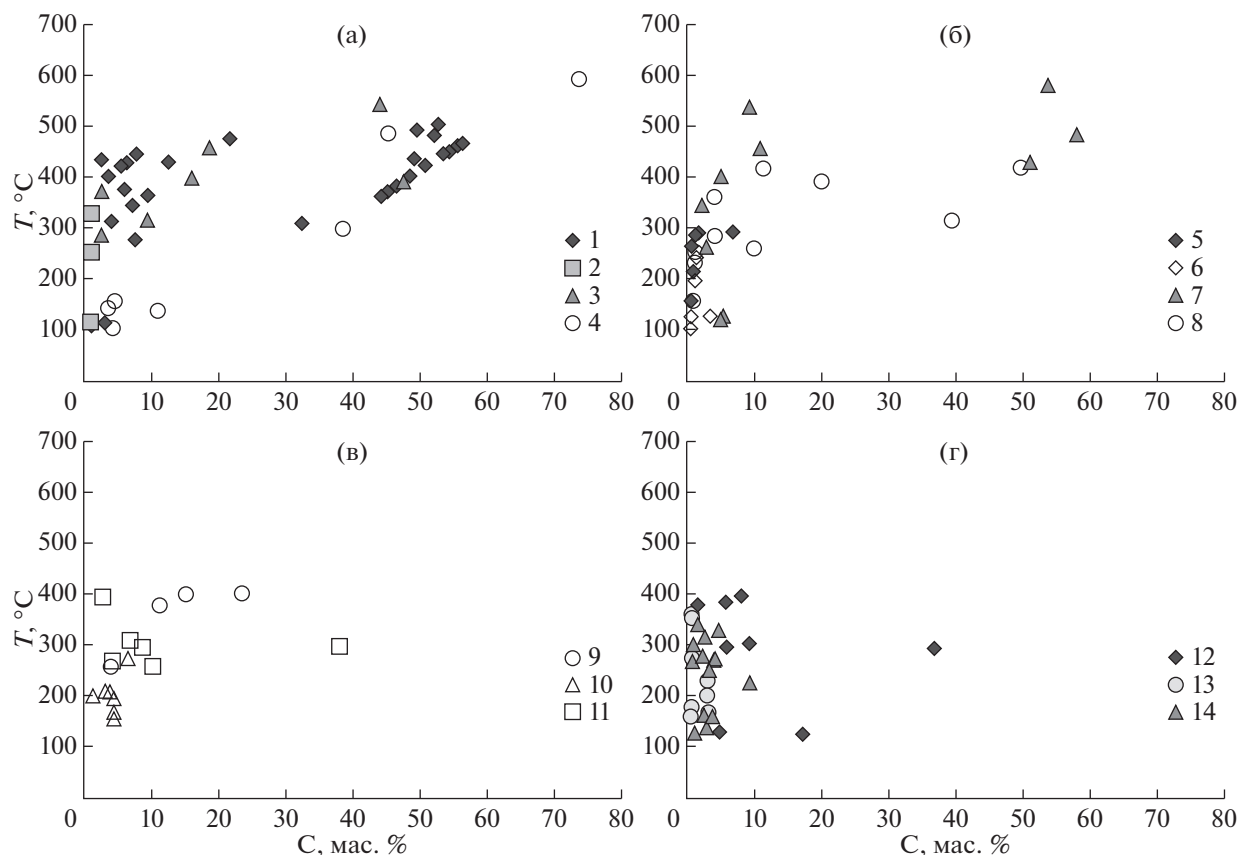
Таблица 3. Окончание

№ пробы	Тип включений*	<i>n</i>	$T_{\text{гом}}, ^\circ\text{C}$	$T_{\text{эвт}}, ^\circ\text{C}$	$T_{\text{пл. льда}}, ^\circ\text{C}$	$T_{\text{пл CO}_2}, ^\circ\text{C}$	C, мас. %-экв. NaCl	$d, \text{г/см}^3$	<i>P</i> , бар
7127-8361	3, П-В	4	277	-27	-0.4	—	0.7	0.75	—
	3, В	5	179	-27	-0.3	—	0.5	0.90	—
	3, В	9	162	-28	-0.2	—	0.3	0.91	—
	3, П	4	230	-24	-1.7	—	2.8	0.85	—
	1, П	8	204	-24	-1.7	—	2.8	0.88	—
	3, П-В	10	171	-25	-1.8	—	3.0	0.92	—
Малыш (кварц)									
7583-951	3, П	3	342	-32	-0.8	—	1.4	0.61	—
	3, П	2	319	-38	-1.6	—	2.7	0.69	—
7960-5350	3, П	2	303	-27	-0.4	—	0.7	0.69	—
	3, П	3	278	-28	-1.3	—	2.2	0.77	—
	3, П	2	273	-25	-2.2	—	3.7	0.79	—
7975-5750	3, П	6	270	-33	-0.4	—	0.7	0.76	—
	3, В	2	139	-27	-1.6	—	2.7	0.95	—
	3, П	2	331	-27	-2.7	—	4.5	0.69	—
	3, П	3	274	-25	-2.4	—	4.0	0.80	—
	3, П-В	2	255	-24	-1.8	—	3.1	0.82	—
	3, В	3	226	-23	-6.1	—	9.3	0.91	—
7583-951	3, В	2	166	-24	-1.4	—	2.4	0.92	—
	3, В	3	162	-26	-2.2	—	3.7	0.94	—
	3, В	3	129	-27	-0.5	—	0.9	0.95	—
	3, П	3	342	-32	-0.8	—	1.4	0.61	—
	3, П	2	319	-38	-1.6	—	2.7	0.69	—
	3, П	2	303	-27	-0.4	—	0.7	0.69	—
7960-5350	3, П	3	278	-28	-1.3	—	2.2	0.77	—
	3, П	2	273	-25	-2.2	—	3.7	0.79	—
	3, П	6	270	-33	-0.4	—	0.7	0.76	—
	3, В	2	139	-27	-1.6	—	2.7	0.95	—
	3, П	2	331	-27	-2.7	—	4.5	0.69	—
	3, П	3	274	-25	-2.4	—	4.0	0.80	—
7975-5750	3, П-В	2	255	-24	-1.8	—	3.1	0.82	—
	3, В	3	226	-23	-6.1	—	9.3	0.91	—
	3, В	2	166	-24	-1.4	—	2.4	0.92	—
	3, В	3	162	-26	-2.2	—	3.7	0.94	—
	3, В	3	129	-27	-0.5	—	0.9	0.95	—
	3, В	3	129	-27	-0.5	—	0.9	0.95	—

Примечание. * П – первичные, П-В – первично-вторичные, В – вторичные. Тип включений по наполнению: 1 – многофазовые включения хлоридных рассолов, 2 – газовые, 3 – двухфазовые газовой-жидкие. Г – гомогенизация в газ, В – возгонка углекислоты.

Флюидные включения в минералах жильной родохрозит-высокомарганцовистый доломит-кварц-полисульфидной минерализации изучены на месторождении Весеннее и проявлении Прямое. Диапазон изменения температур и концен-

траций солей для этих флюидов представлен на фиг. 6в. В кварце и сфалерите встречаются, главным образом, двухфазовые флюидные включения типа 3. Редко попадаются газовые флюидные включения типа 2, сингенетичные двухфазовым и



Фиг. 6. Диаграммы “температура–концентрация” для рудообразующих флюидов разных типов рудной минерализации Баймской зоны: а – прожилково-вкрапленная халькопирит-борнит-кварцевая минерализация (1 – Песчанка, кварц; 2–3 – Весеннее, кварц; 3 – Малыш, кварц; 4 – Правый Светлый, кварц); б – жильная доломит-кварц-полисульфидная минерализация (5 – Песчанка, кварц; 6 – Песчанка, флюорит; 7 – Находка, кварц; 8 – Прямое, кварц); в – жильная родохрозит-высокомарганцевый доломит-кварц-полисульфидная минерализация (9 – Весеннее, кварц; 10 – Весеннее, сфалерит; 11 – Прямое, кварц); г – жильная кварц-кальцит-полисульфидная минерализация (12 – Правый Светлый, кварц; 13 – Вилка, кварц; 14 – Малыш, кварц).

свидетельствующие о гетерогенном состоянии гидротермального флюида. Найдена одна группа трехфазовых включений хлоридных рассолов в кварце проявления Прямое.

Включения рассолов типа 1 в кварце гомогенизируются при температуре 298°C , а концентрация солей составляет 37.4 мас. %-экв. NaCl. Плотность флюида 1.08 г/см^3 . Двухфазовые (тип 3) газозо-жидкие флюидные включения в кварце гомогенизируются в жидкость при температурах $404\text{--}257^{\circ}\text{C}$, концентрация солей составляет 22.9–3.8 мас. %-экв. NaCl, плотность флюида изменяется от 0.70 до 1.08 г/см^3 . Существенно газовые флюидные включения (тип 2), сингенетичные наиболее высокотемпературным включениям типа 3, содержат малоплотный водяной пар и небольшое количество водного флюида. Они гомогенизируются в газ при температурах $404\text{--}395^{\circ}\text{C}$, давление насыщенного пара воды составляет 280–260 бар.

Двухфазовые (тип 3) газозо-жидкие флюидные включения в сфалерите гомогенизируются в жидкость при температурах $275\text{--}156^{\circ}\text{C}$, концентрация солей составляет 6.3–1.2 мас. %-экв. NaCl, плотность флюида $0.82\text{--}0.94 \text{ г/см}^3$.

Флюидные включения в минералах жильной кварц-кальцит-полисульфидной минерализации изучены на проявлениях Правый Светлый, Вилка и Малыш. Диапазон изменения температур и концентраций солей для этих флюидов представлен на фиг. 6г. В кварце этой ассоциации встречаются, главным образом, двухфазовые флюидные включения типа 3. Редко попадаются газовые флюидные включения типа 2, сингенетичные двухфазовым и свидетельствующие о гетерогенном состоянии гидротермального флюида. Найдена одна группа трехфазовых включений хлоридных рассолов в кварце рудопроявления Правый Светлый.

Включения рассолов типа 1 в кварце гомогенизируются при температуре 296°C , а концентра-

ция солей составляет 37.0 мас. %-экв. NaCl. Плотность флюида 1.09 г/см³. Двухфазовые (тип 3) газозо-жидкие флюидные включения в кварце гомогенизируются в жидкость при температурах 389–128°C, концентрация солей составляет 17.2–0.3 мас. %-экв. NaCl, плотность флюида изменяется от 0.53 до 1.06 г/см³. Существенно газовые флюидные включения (тип 2), сингенетичные наиболее высокотемпературным включениям типа 3, содержат малоплотный водяной пар и небольшое количество водного флюида. Они гомогенизируются в газ при температурах 400–356°C, давление насыщенного пара воды составляет 270–170 бар.

Проведенные исследования показали, что гидротермальное рудоотложение в пределах Баимской рудной зоны происходило в широком интервале температур (594–104°C) и давлений (1200–170 бар) из водных флюидов с сильно меняющейся соленостью. Каждому типу минерализации соответствует вполне определенный диапазон физико-химических параметров и химического состава рудообразующего флюида.

ГЕОХИМИЧЕСКАЯ ЗОНАЛЬНОСТЬ РУДООБРАЗУЮЩИХ СИСТЕМ

В основу изучения геохимической зональности порфирово-эпитептермальных систем (ПЭС) Песчанка и Находка легли результаты химического анализа кернa скважин, пробуренных на изучаемой территории в период 2010–2013 гг. на глубины в среднем до 300 м. Геохимические данные по скважинам были обработаны в программе STATISTICA методом факторного анализа главных компонент (Боровиков, 2013). В результате проведенной обработки было получено шесть факторов с суммарным вкладом, равным 77% от общей изменчивости аномального геохимического поля, отражающих корреляционные связи между четырнадцатью рудными элементами (табл. 5).

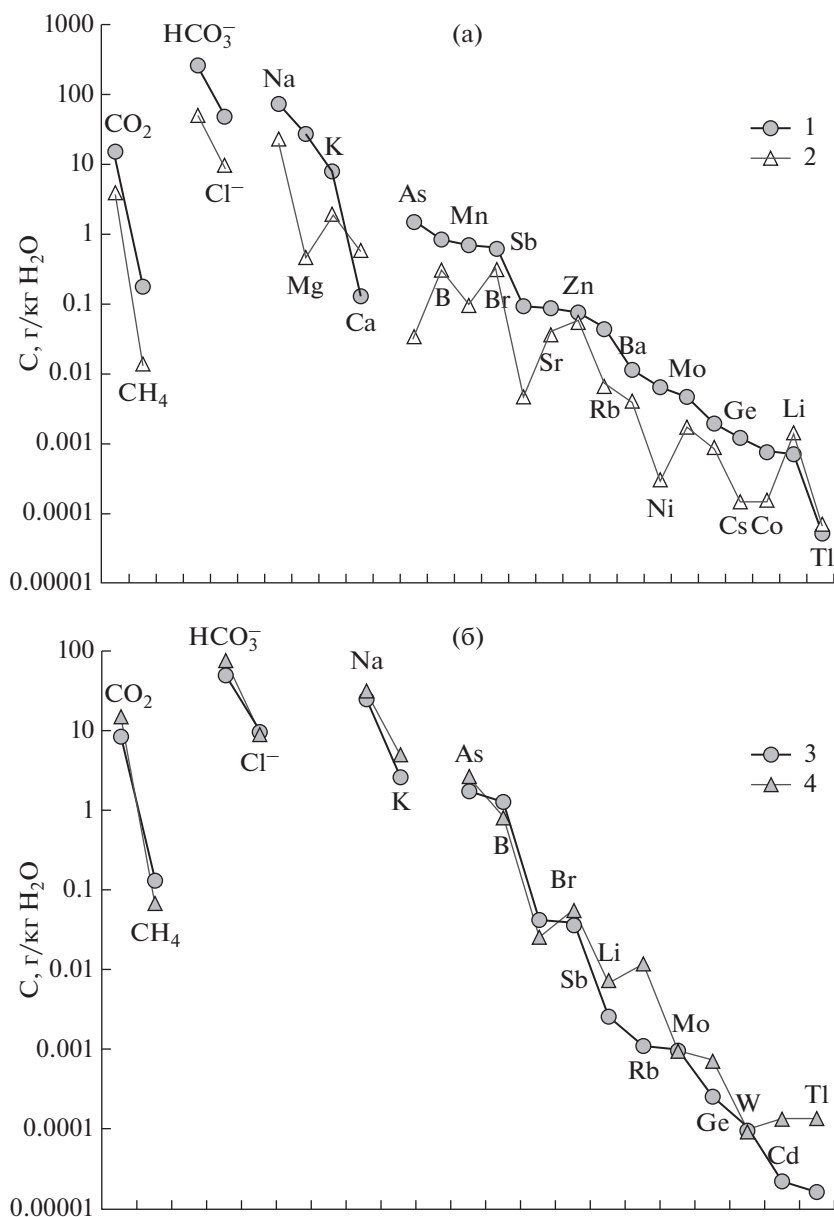
Элементы, согласно весам, группируются в факторы, или геохимические ассоциации, которые могут быть сопоставлены с минеральными парагенезисами основных стадий рудоотложения. Соотнесение геохимических и минеральных ассоциаций подтверждается коэффициентами корреляции между значениями факторов и содержанием главных рудных минералов по соответствующим интервалам кернa скважин (табл. 6, 7).

Минерализация порфирикового этапа формирования ПЭС (1 тип минерализации) характеризуется факторами 4–6. Значения фактора F4 коррелируют с количеством пирита, что дает основание связать геохимическую ассоциацию Fe(MnAu) с наиболее ранней пиритовой минерализацией

Таблица 4. Состав растворов флюидных включений в кварце разных ассоциаций некоторых месторождений и рудопроявлений Баимской зоны

Ассоциация*	1		2	
	Песчанка	Малыш	Находка	Прямое
<i>Макрокомпоненты, г/кг воды</i>				
CO ₂	16.5	4.2	9.2	16.0
CH ₄	0.19	0.01	0.14	0.07
Cl ⁻	50.3	9.9	10.1	9.90
HCO ₃ ⁻	269.2	53.0	54.8	85.2
Na	76.7	23.8	27.0	34.3
K	8.0	2.0	2.8	5.2
Ca	0.13	0.60	–	0.38
Mg	27.65	0.46	–	0.45
<i>Микрокомпоненты, 10⁻³ г/кг воды</i>				
Br	673.6	316.7	44.1	25.9
As	1632	33.4	1805	2816
Li	0.76	1.58	2.61	7.50
B	903	331	1360	880
Rb	42.87	6.97	1.16	12.31
Cs	2.08	0.93	–	0.51
Sr	86.2	38.98	–	24.55
Mo	5.15	1.78	1.02	1.02
Ag	–	–	–	0.016
Sb	97.4	4.81	40.2	59.1
Zn	79.4	57.6	–	–
Cd	–	0.48	0.02	0.14
Pb	–	–	–	0.43
Bi	0.05	–	–	0.03
Th	–	–	–	0.02
Ga	51.7	–	–	–
Ge	0.93	0.15	0.28	0.75
Sc	1.27	–	–	1.02
Ti	–	–	–	0.86
Mn	730	101.3	–	72.4
Fe	195	–	–	15.46
Co	0.79	0.16	–	0.21
Ni	6.74	0.31	–	0.76
V	–	–	–	13.55
Cr	0.90	–	–	0.06
Zr	–	–	–	0.01
Sn	0.09	–	–	0.24
Ba	12.39	4.29	–	–
W	2.08	–	0.10	0.10
Hg	0.35	–	–	–
Tl	0.05	0.07	0.02	0.14
REE	0.19	–	–	0.08
La	0.07	–	–	0.02
Ce	–	–	–	0.04
Pr	–	–	–	0.02
Nd	–	–	–	0.01
K/Rb	186	284	2405	426

Примечание. * Минеральные ассоциации: 1 – прожилково-вкрапленная халькопирит-борнит-кварцевая минерализация; 2 – жильная доломит-кварц-полисульфидная минерализация.



Фиг. 7. Химический состав рудообразующего флюида прожилково-вкрапленной халькопирит-борнит-кварцевой минерализации (а) и жильной доломит-кварц-полисульфидной минерализации (б). Месторождения и рудопроявления: 1 – Песчанка, 2 – Малыш, 3 – Находка, 4 – Прямое.

порфинового этапа формирования рудоносной структуры. Значения фактора F6, отвечающие ассоциации Mo(Cu), статистически связаны с содержаниями халькопирита и молибденита, образующих основной минеральный парагенезис Cu–Mo-порфинового (халькопирит-молибденитового) оруденения. Значения фактора F5 коррелируют с содержаниями борнита и халькопирита, что позволяет соотнести геохимическую ассоциацию CuBi(Se) с наиболее богатыми борнитовыми рудами поздне-порфировой стадии рудоотложения.

Однозначно интерпретируется выделенная по значениям F2 геохимическая ассоциация SbAs(CuSe), имеющая корреляцию с блеклорудной минерализацией, формирующейся на границе порфинового и эпитермального этапов развития ПЭС.

Минерализация эпитермального этапа формирования ПЭС (2–4 типы минерализации) характеризуется ассоциациями ZnPbCdMnAg(Au) и TeAuSe(Ag), выделенными по значениям факторов F1 и F3. Первая ассоциация по составу и устойчивой корреляции значений факторов с со-

держаниями сфалерита и галенита соответствует субэпитермальной серебро-полиметаллической минерализации, вторая – золото-серебряному оруденению IS-типа. Положительная корреляция между значениями фактора F3 и содержаниями пирита, сфалерита и борнита, при отсутствии в документации сведений о редких минералах золота и серебра, косвенно свидетельствует только о пространственном наложении золото-серебряной минерализации на рудоносные образования порфировой и субэпитермальной стадий рудоотложения. Однако сам состав ассоциации полностью согласуется с результатами минералогических исследований, на основании которых выделен тесный парагенезис более низкопробного самородного золота с гесситом (Нагорная, 2013).

Значения факторов, средневзвешенные на длину скважин, использовались для построения схемы зональности рудного поля Находка в плане.

По распределению геохимических ассоциаций в строении рудного поля Находка наблюдается отчетливая зональность (фиг. 8а).

Геохимическая структура рудного поля имеет форму подковы, внутренняя часть которой является фоновой (безрудной). В аномальном поле, обрамляющем безрудное пространство, внутренняя зона сформирована ассоциациями рудных элементов, которые относятся к продуктивным стадиям Cu–Mo-порфирового этапа развития ПЭС, а внешняя – геохимической ассоциацией, соответствующей Au-пиритовой минерализации.

Ассоциации, отвечающие рудоотложению переходного и эпитермального этапов развития, в большей степени тяготеют к внешней зоне, хотя зачастую наложены на внутреннюю, особенно в южной части рудного поля.

Наилучшим образом зональные взаимоотношения между ассоциациями главных типов рудной минерализации, указывающие на приуроченность эпитермальной минерализации к внешней “пиритовой” оболочке, проявляются при построении изолиний мультипликативного показателя $AuAgTe/CuMoBiSe \times 1000$, в числитель которого вошли элементы эпитермального этапа, а в знаменатель – порфирового (фиг. 8б).

Высокие значения этого показателя, связанные с развитием благороднометаллической эпитермальной минерализации, характерны для южной части рудного поля (месторождение Весеннее, юг проявления Прямое) и затухают к северу, где доминирует порфировое оруденение (богатый медный штокверк проявления III Весеннее).

В западной части подковообразной структуры выделяется наиболее обширная область высоких значений мультипликативного показателя, связанная с преобладающим развитием субэпитермальной полиметаллической и эпитермальной золото-серебряной минерализации месторожде-

Таблица 5. Результаты факторного анализа геохимических данных методом главных компонент

Элементы	Факторы					
	F1	F2	F3	F4	F5	F6
Ag	0.66*	0.15	0.49	0.08	0.09	0.09
As	0.08	0.84	0.02	0.17	0.15	0.14
Au	0.26	0.03	0.72	0.21	0.04	0.10
Bi	0.07	0.04	0.07	0.08	0.86	–0.10
Cd	0.88	0.03	0.12	–0.04	0.05	0.00
Cu	–0.07	0.23	0.11	0.00	0.66	0.40
Fe	0.03	0.04	0.06	0.93	0.07	–0.09
Mn	0.72	–0.01	–0.04	0.37	–0.14	–0.07
Mo	0.03	0.03	0.01	–0.09	0.01	0.93
Pb	0.91	0.06	0.11	–0.04	0.02	0.02
Sb	0.06	0.89	0.12	–0.08	0.02	–0.05
Se	0.00	0.20	0.65	0.00	0.34	–0.03
Te	0.11	0.05	0.90	–0.03	0.01	–0.02
Zn	0.94	0.03	0.05	0.03	0.01	0.02

* Полужирный шрифт – значимые значения факторной нагрузки.

Таблица 6. Корреляция между содержанием сульфидов и значениями факторов по данным опробования керна скважин

Минералы	Факторы					
	F1	F2	F3	F4	F5	F6
Пирит	0.06	0.02	0.16*	0.24	0.12	–0.01
Халькопирит	–0.05	0.06	0.06	0.01	0.27	0.21
Борнит	–0.12	–0.03	0.18	0.09	0.28	0.10
Блеклые руды	0.07	0.18	–0.06	0.08	0.12	0.05
Молибденит	0.09	–0.02	–0.01	–0.03	0.05	0.18
Сфалерит	0.51	–0.03	0.14	–0.09	0.11	0.05
Галенит	0.37	0.01	0.01	–0.04	0.07	0.01

* Полужирный – значимые значения коэффициента корреляции.

ния Весеннее. Медно-порфировое оруденение в этой части рудного поля было обнаружено по результатам бурения только недавно, на глубине около 200 м от поверхности.

На фоне общей концентрической зональности в строении геохимического поля, в целом соответствующей классическим схемам рудно-метасоматической зональности ПЭС (Lowell, Gilbert, 1970), следует отметить некоторые особенности, вытекающие из изучения конкретного объекта. К их числу, прежде всего, относятся выявленные отличия в строении западной и восточной частей аномального поля. Как уже отмеча-

Таблица 7. Геохимические ассоциации, выделенные по результатам факторного анализа, и связанные с ними минералы в соответствии с предполагаемыми стадиями оруденения

Геохимическая ассоциация	Коррелирующие минералы	Порфиновый этап	Субэпитеpмальный этап	Эпитеpмальный этап
F4 Fe(MnAu)	Пирит			
F6 Mo(Cu)	Халькопирит, молибденит			
F5 BiCu(Se)	Борнит, халькопирит			
F2 SbAs(CuSe)	Блеклые руды			
F1 ZnPbCdMnAg(Au)	Сфалерит, галенит			
F3 TeAuSe(Ag)	Борнит, пирит, сфалерит			

лось выше, в составе первой преобладают ассоциации эпитеpмального этапа развития ПЭС и высокие значения мультипликативного показателя зональности, во второй – ассоциации Cu–Mo–порфиpового этапа и низкие значения мультипликативного показателя зональности. Причиной этого может служить не только наблюдаемая латеральная зональность аномального поля, но и различный уровень эрозийного среза, связанный с вертикальными пострудными движениями отдельных блоков.

Исследование вертикальной геохимической зональности было проведено по опорным разрезам на всех проявлениях Находкинской ПЭС и месторождения Песчанка. Для определения последовательности отложения рудных элементов и выявления критериев оценки уровня эрозийного среза оруденения по всем опорным разведочным профилям были рассчитаны средневзвешенные содержания 14 рудных элементов на интервалы 50 м по глубине.

Исходя из результатов обработки по программе исследования зональности НЮ-2 в соответствии с методикой, разработанной на кафедре геохимии геологического факультета МГУ (Соловов и др., 1990), были выявлены показатели зональности третьего порядка, монотонно убывающие с глубиной: $v_1 = \text{AgPbZn/CuBiMo}$.

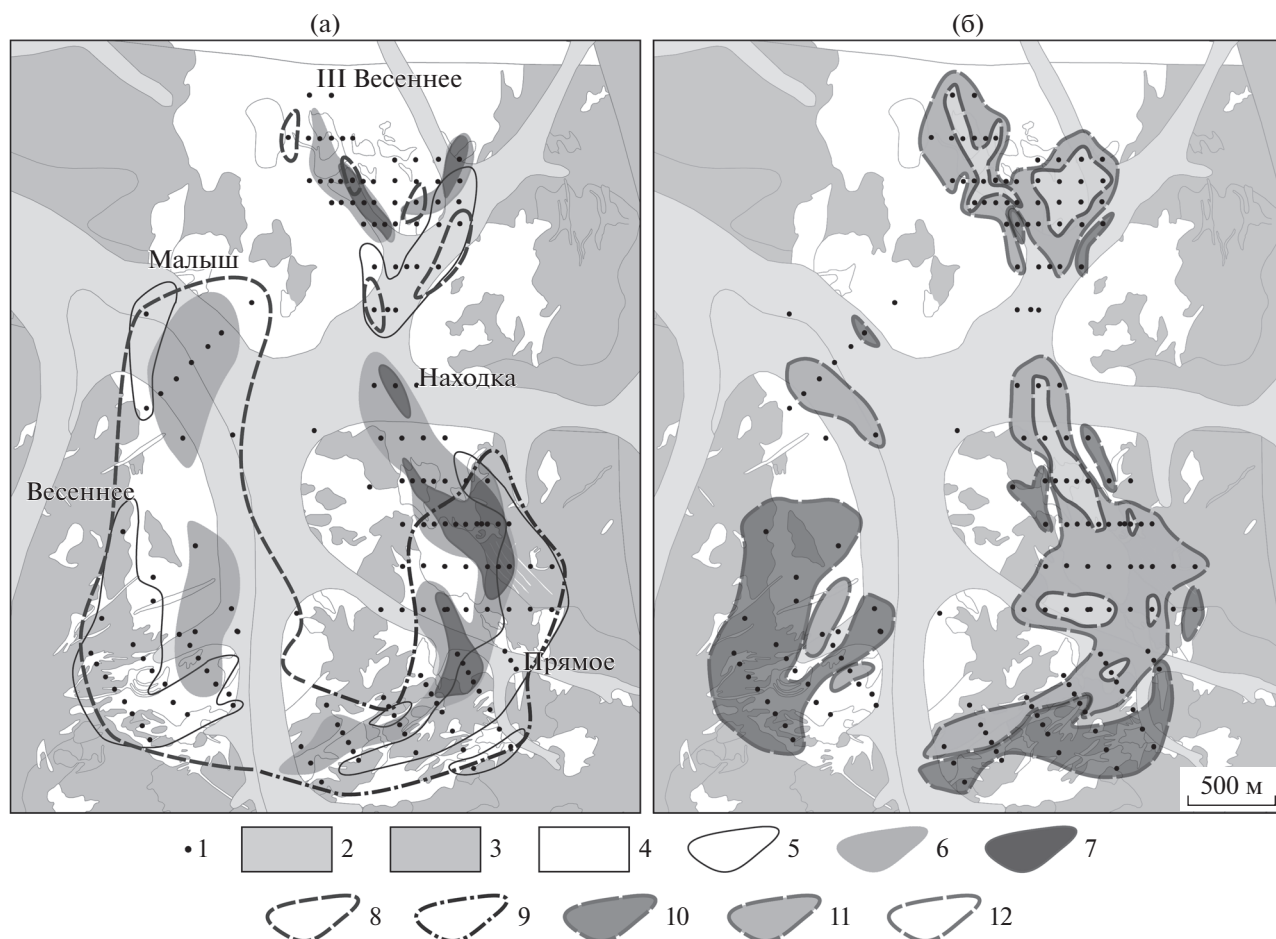
Показатель AgPbZn/CuBiMo применим для оценки уровня эрозийного среза порфиpово-эпитеpмальной системы в целом. Геохимическая ассоциация, представленная в числителе дроби, соотносится с составом субэпитеpмальных и золото-серебряных эпитеpмальных руд, развитых на флангах и/или, как на месторождении Весеннее, гипсометрически выше медно-порфиpового

штокверка, ключевые рудные элементы которого представлены в знаменателе.

На фиг. 9 представлены графики изменения значений этого показателя по типовым разрезам через участки рудного поля Находка и месторождение Песчанка, соотнесенные с построенной нами обобщенной формализованной моделью рудной минерализации объектов Баймской зоны.

Значения показателя AgPbZn/CuBiMo изменяются в пределах восьми порядков. Минимальные значения установлены для проявления III Весеннее (от $n \times 10^{-3}$ до $n \times 10^{-2}$), где полиметаллическая и Au–Ag минерализация наименее развиты. Диапазон средних значений ($n \times 10^{-3} - n \times 10^1$) отмечен на месторождении Песчанка, для которого характерно наложение субэпитеpмальной минерализации на объем медно-порфиpового штокверка, и на объектах Находка и Прямое, где геохимические ассоциации поздних стадий приурочены к фланговым зонам. Максимальные значения показателя ($n \times 10^1 - n \times 10^4$) получены для золото-серебряного месторождения Весеннее.

Результаты оценки уровня эрозийного среза объектов Находкинской ПЭС и месторождения Песчанка по значениям показателя зональности AgPbZn/CuBiMo приведены на фиг. 10. Месторождение Весеннее характеризуется верхнерудным уровнем среза, эпитеpмальная минерализация сохранена здесь наиболее полно, и на глубине прогнозируется существенный объем медно-порфиpовых руд. Верхне-среднерудный срез имеет штокверк проявления Прямое. Более эродированными являются штокверки участка Находка и месторождения Песчанка, эпитеpмальное и субэпитеpмальное оруденение которых было существенно эродировано, и в настоящее время на участках



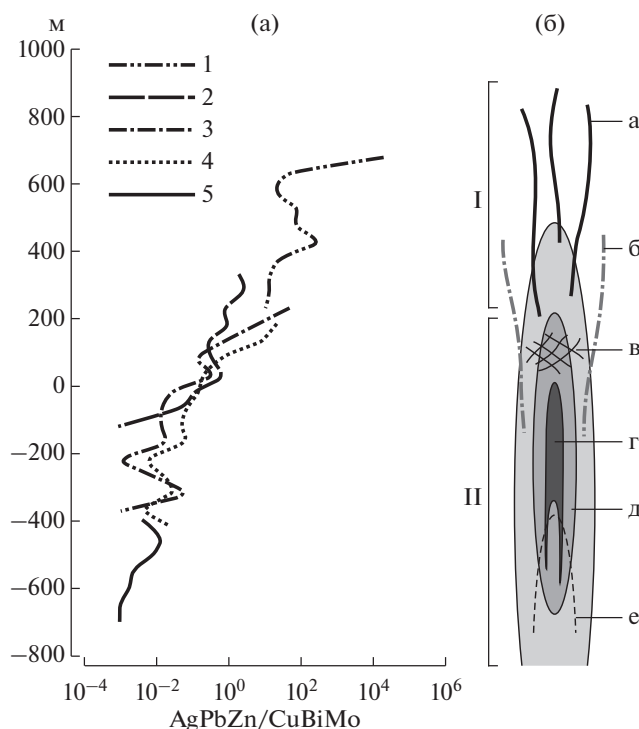
Фиг. 8. Структура геохимического поля Находкинской ПЭС в плане (а – по данным факторного анализа, б – по мультипликативному показателю). 1 – устья скважин; 2–4 – геологические образования: 2 – четвертичные отложения, 3 – вулcano-терригенные породы верхнеюрского возраста, 4 – тела порфиров егдыгкычского комплекса, с которыми ассоциирует Cu–Mo-порфировое оруденение; 5–9 – области развития геохимических ассоциаций и соответствующие им элементы порфиново-эпитеpмальной системы: 5 – Fe(MnAu)-пиритовые “оторочки” рудных штокверков; 6 – Mo(Cu)–Cu–Mo-порфировые штокверки; 7 – BiCu(Se) – богатые борнитовые ядра Cu–Mo-порфировых штокверков; 8 – ZnPbCdMnAg(Au) и TeAuSe(Ag) – жильно-прожилковые зоны с субэпитеpмальной Ag-полиметаллической и эпитеpмальной Au–Ag минерализацией; 9 – SbAs(CuSe) – проявления блеклорудной минерализации; 10–12 – области значений мультипликативного показателя AuAgTe/CuMoBiSe $\times 1000$: 10 – повышенные значения (>300), характерные для участков развития благороднометалльной эпитеpмальной минерализации; 11 – средние значения (0.1–10), отвечающие Cu–Mo-порфировым штокверкам; 12 – низкие значения (<0.1), соответствующие богатым борнитовым “ядрам” в рудных штокверках.

фиксируются лишь реликты этих стадий минерализации. Наименее сохранилась порфиново-эпитеpмальная система в районе проявления III Весеннее, эрозионный срез которого соответствует нижнерудному: здесь не только практически не сохранились признаки эпитеpмальной и переходной минерализации, но и медно-порфировые руды, судя по уменьшению мощности рудных тел по падению, будут резко выклиниваться с глубиной.

ОБСУЖДЕНИЕ

Геологические, минералогические и термобарогеохимические данные свидетельствуют, что

разные типы минерализации Баимской рудной зоны можно привязать к разным производным порфиново-эпитеpмальных систем. Исследование флюидных включений показало, что флюидный режим при формировании жильно-вкрапленной халькопирит-борнит-кварцевой ассоциации типичен для месторождений золото-медно-порфирового типа. Об этом свидетельствуют высокие температуры начала рудообразующего процесса, явления гетерогенизации флюида, наличие включений хлоридных рассолов (Roedder, 1971; Nash, 1976; Eastoe, 1978; Ahmad, Rose, 1980; Klemm *et al.*, 2007; и др.). Жильная доломит-кварц-полисульфидная ассоциация по



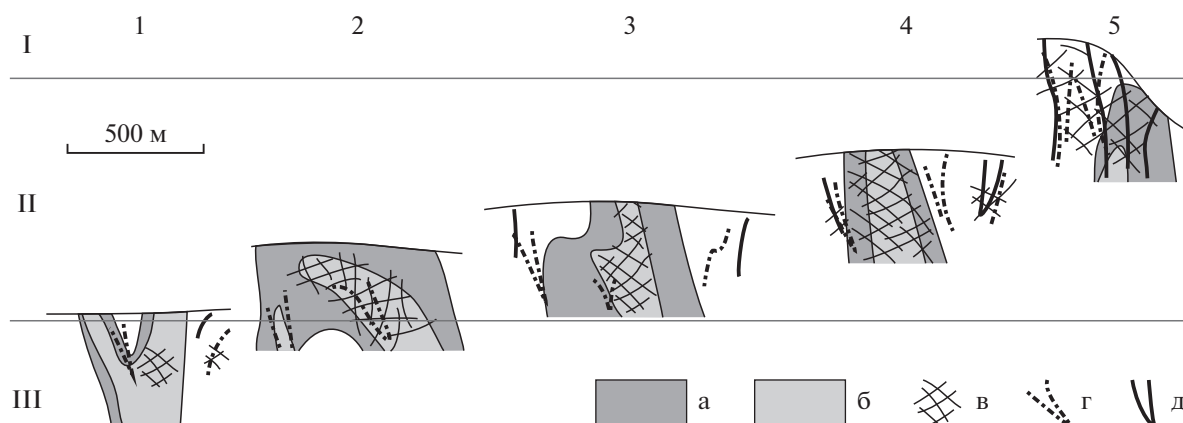
Фиг. 9. Изменение значений показателя вертикальной геохимической зональности $AgPbZn/CuBiMo$ (а) и геологическая модель порфирово-эпитеpмальной системы (б). Приведена модельная шкала глубин от предполагаемой на момент рудообразования поверхности. 1–5 – проявления Баимской рудной зоны: 1 – Весеннее, 2 – Прямое, 3 – Находка, 4 – Песчанка, 5 – III Весеннее. I–II – элементы порфирово-эпитеpмальной системы: I – золото-серебряная минерализация (геохимическая ассоциация $AuAgPbZnCuAsSbMnTeSe$), II – молибден-медно-порфиpовые руды ($CuMoAuBi$). а–е – основные минеральные ассоциации: а – $Au-Ag$ -эпитеpмальная (самородное золото, гессит, петцит, блеклые руды), б – $Au-Ag$ -полиметаллическая субэпитеpмальная (сфалерит, галенит, халькопирит, блеклые руды), в – переходная блеклорудная (теннантит-тетраэдритовая), г – борнит-халькопиритовая, д – халькопирит-молибденитовая, е – молибденит-халькопиритовая.

диапазону температур и концентраций солей имеет черты сходства с оруденением субэпитеpмального (переходного) типа (Le Fort *et al.*, 2011). Жильные родохрозит-высокомарганцевый доломит-кварц-полисульфидная и кварц-кальцит-полисульфидная ассоциации отвечают оруденению эпитеpмального типа, признаки которого приведены в работе (Simmons *et al.*, 2005). Оценки давлений, полученные по ассоциациям включений гетерогенного флюида, указывают на формирование порфиpовой минерализации на глубинах 0.8–4.4 км, субэпитеpмальной (переходной) – на глубинах 1.0–1.7 км, а эпитеpмальной – на глубине около 0.7 км.

Минералогические данные свидетельствуют, что по пробности самородное золото Баимской рудной зоны разделяется на три группы: высокопробное (917–926), средней пробности (868–878) и низкопробное и электрум (657–857). Анализ литературы показывает, что высокая пробность золота в порфирово-эпитеpмальных системах обычна для медных халькопирит-борнитовых руд и эпитеpмальной минерализации HS-типа (Bogdanov *et al.*, 2005; Bonev *et al.*, 2002; Corbett, Leach, 1998). Поскольку на месторождениях и проявлениях Баимской рудной зоны минерализация HS-типа отсутствует или эродирована (Нагорная, 2013), то высокопробное самородное золото нельзя отнести к такому типу минерализации. В то же время золото находится в ассоциации с борнитом и халькопиритом в биотит-кальшпат-кварцевых метасоматитах при отсутствии других сульфидов. Эти факты позволяют предположить, что высокопробное золото откладывалось в конце стадии формирования собственно порфиpового оруденения. Самородное золото средней и низкой пробности и электрум типичны для карбонат-полисульфидной (переходной, субэпитеpмальной) минерализации и эпитеpмальной минерализации IS-типа (Bogdanov *et al.*, 2005; Corbett, Leach, 1998; Carrillo-Rosúa, 2008; LeFort *et al.*, 2011). Так как на месторождении Весеннее самородное золото, электрум и ассоциирующие галенит, сфалерит, теннантит-тетраэдрит, петцит, гессит, штюцит, акантит находятся в карбонат-кварцевых жилах, где карбонаты представлены высокомарганцевистым доломитом и родохрозитом (Нагорная, 2013), которые, согласно работе (Sillitoe, Hedenquist, 2003), типичны для эпитеpмальной минерализации IS-типа, то благороднометаллическая минерализация месторождения относится именно к этому типу.

Относительно низкая пробность изученного самородного золота на месторождении Песчанка и проявлении III Весеннее объясняется его возможной принадлежностью к субэпитеpмальной стадии развития порфирово-эпитеpмальной системы, поскольку, с одной стороны, оно ассоциирует с гесситом, а с другой – в ассоциации отсутствуют высокомарганцевистые карбонаты.

На проявлении Малыш золото ассоциирует с гесситом, петцитом, куриллитом и фазами состава $Ag-Te-Se$ и $Ag-Bi-Se$, селенистым галенитом до клаусталлита. Наличие селеносодержащих минералов и отсутствие высокомарганцевистых карбонатов не позволяет отнести изученную ассоциацию к IS-типу. В то же время селеносодержащие минералы в ассоциации с самородным золотом типичны как для HS-, так LS-типов эпитеpмальной минерализации. К сожалению, мы не располагаем данными о взаимоотношениях гессита и золота – с одной стороны, и серебро- и селен-содержащих минералов – с другой.



Фиг. 10. Уровень эрозионного среза месторождений и проявлений Баимской рудной зоны. Уровни эрозионного среза I–III: I – верхнерудный, II – среднерудный, III – нижнерудный. Месторождения и проявления 1–5: 1 – III Весеннее, 2 – Песчанка, 3 – Находка, 4 – Прямое, 5 – Весеннее (вертикальный масштаб для последнего участка искажен). Элементы геологического строения объектов (а–д): а – молибден-медно-порфировый штокверк, б – богатые борнитовые руды, в – блеклорудная минерализация, г – полисульфидные субэпитеpмальные жилы и прожилки, д – жилы с золото-серебряной эпитеpмальной минерализацией.

Ассоциация низкопробного самородного золота, акантита, науманнита, селенистого пирсеита и арсенополибазита, обнаруженная нами на проявлениях Вилка и Правый Светлый, обычна для LS-типа эпитеpмального оруденения (Sillitoe, Hedenquist, 2003).

По результатам факторного анализа данных опробования скважин выявлены геохимические ассоциации, позволяющие локализовать области развития минерализации различных стадий формирования порфирово-эпитеpмальной системы. Предложен показатель вертикальной геохимической зональности $AgPbZn/CuBiMo$. Диапазоны значений этого показателя по отдельным разрезам рассматриваемых участков позволяют оценить уровень эрозионного среза проявлений в метрике порфирово-эпитеpмальной системы. Месторождение Весеннее характеризуется верхнерудным уровнем среза, эпитеpмальная минерализация сохранена здесь наиболее полно, и на глубине прогнозируется существенный объем медно-порфировых руд. Верхне- и среднерудный срез определен на проявлении Прямое. Далее в этом ряду следуют месторождение Песчанка и проявление Находка, эпитеpмальное и субэпитеpмальное оруденение которых было существенно эродировано, и в настоящее время на участках фиксируются лишь реликты этих стадий. Наименее сохранилась порфирово-эпитеpмальная система в области проявления III Весеннее, эрозионный срез которого соответствует нижнерудному уровню: здесь не только практически не осталось признаков эпитеpмальной и переходной минерализации, но и медные порфировые руды, скорее всего, будут резко выклиниваться с глубиной.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

На золото-молибден-медно-порфировых месторождениях и проявлениях Баимской зоны на Западной Чукотке установлены четыре типа минеральных ассоциаций, содержащих минералы благородных металлов. Халькопирит + борнит + кварцевая ассоциация первого типа с высокопробным самородным золотом в виде вrostков в борните формируется в конце порфирового этапа развития порфирово-эпитеpмальной системы. Ассоциация второго типа – низкоарганцовистый доломит + кварц + сульфиды (халькопирит, сфалерит, галенит, теннантит-тетраэдрит) ± турмалин, содержащая низкопробное самородное золото и гессит, отнесена к переходной (субэпитеpмальной) стадии. Родохрозит + высокоарганцовистый доломит + кварц + сульфиды (халькопирит, сфалерит, галенит, теннантит-тетраэдрит) – ассоциация с низкопробным самородным золотом, электрумом, акантитом, Ag и Au–Ag теллуридами и Ag сульфосолями, представляющая третий тип, относится к эпитеpмальному LS-оруденению. Ассоциация четвертого типа кальцит + кварц + сульфиды (халькопирит, сфалерит, галенит) с низкопробным самородным золотом, сульфидами и селенидами серебра и серебросодержащими сульфосолями принадлежит эпитеpмальному LS-оруденению. Изучение газово-жидких включений в кварце, сфалерите, флюорите свидетельствует, что гидротермальное рудоотложение в пределах Баимской рудной зоны происходило в широком интервале температур (594–104°C) и давлений (1200–170 бар) из водных флюидов с сильно менявшейся соленостью. Установлено, что по показателю вертикальной геохимической зональности $AgPbZn/CuBiMo$ уровень эрозионного сре-

за месторождений и проявлений Баимской рудной зоны увеличивается в ряду месторождение Весеннее → проявление Прямое → проявление Находка → месторождение Песчанка → проявление III Весеннее.

БЛАГОДАРНОСТИ

Авторы признательны И.А. Брызгалову и О.В. Япаскурту за выполнение электронно-зондовых исследований. Мы благодарны О.Ю. Плотинской и В.В. Аристову за ценные замечания, сделанные при подготовке рукописи. Работа выполнена при финансовой поддержке Российского научного фонда (проект № 14–17–00170), РФФИ (проект 14–05–31198а) и ООО ГДК Баимская.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Бакшеев И.А., Николаев Ю.Н., Прокофьев В.Ю. и др.* Золото-молибден-медно-порфирово-эпитермальная система Баимской рудной зоны, Западная Чукотка // *Металлогения древних и современных океанов-2014. Двадцать лет на передовых рубежах геологии месторождений полезных ископаемых. Миасс: Ин-т минералогии УрО РАН, 2014. С. 108–112.*
- Боровиков В.П.* Популярное введение в современный анализ данных в системе STATISTICA. Учебное пособие для вузов. М.: Горячая линия–Телеком, 2013.
- Борисенко А.С.* Изучение солевого состава газово-жидких включений в минералах методом криометрии // *Геология и геофизика. 1977. № 8. С. 16–27.*
- Волков А.В., Савва Н.Е., Сидоров А.А. и др.* Закономерности размещения и условия формирования Au-содержащих Cu–Mo-порфириновых месторождений северо-востока России // *Геология руд. месторождений. 2006. Т. 48. № 6. С. 512–539.*
- Калужный В.А.* Основы учения о минералообразующих флюидах. Киев: Наукова думка, 1982. 240 с.
- Котова М.С., Нагорная Е.В., Аносова М.О. и др.* Датирование метасоматического процесса и рудоносных гранитоидов медно-порфириновых месторождений Находкинского рудного поля (Западная Чукотка) // *Геохронометрические изотопные системы, методы их изучения, хронология геологических процессов: Матер. V Российской конф. по изотопной геохронологии. М.: ИГЕМ РАН, 2012. С. 181–184.*
- Кряжев С.Г., Прокофьев В.Ю., Васюта Ю.В.* Использование метода ICP MS при анализе состава рудообразующих флюидов // *Вестник МГУ. Серия 4 Геология. 2006. № 4. С. 30–36.*
- Нагорная Е.В.* Минералогия и зональность молибден-медно-порфиринового рудного поля Находка, Чукотка. Автореф. дисс. канд. геол.-мин. наук. М., 2103. 28с.
- Прокофьев В.Ю.* Типы гидротермальных рудообразующих систем (по данным исследования флюидных включений) // *Геология руд. месторождений. 1998. № 6. С. 514–528.*
- Реддер Э.* Флюидные включения в минералах. Т. 1. М.: Мир, 1978. 360 с.
- Соловов А.П., Архипов А.Я., Бугров В.А. и др.* Справочник по геохимическим поискам полезных ископаемых. М.: Недра, 1990.
- Чвилева Т.Н., Безмертная М.С., Спиридонов Э.М. и др.* Справочник-определитель рудных минералов в отраженном свете. М.: Недра, 1988. 504 с.
- Читалин А.Ф., Усенко В.В., Фомичев Е.В.* Баимская рудная зона – кластер крупных месторождений цветных и драгоценных металлов на западе Чукотского АО // *Минеральные ресурсы России. Экономика и управление. 2013. № 6. С. 68–73.*
- Шавкунов Б.Н.* Использование геофизических и геохимических данных для оконтуривания рудных полей в пределах Баимского золотоносного узла // *Геохимические методы поисков месторождений золота по вторичным ореолам рассеяния. Зап. Забайкал. фил. географ. об-ва СССР: Чита, 1973. Вып. 88. С. 112–114.*
- Шановалов В.С.* Признаки единой РМС на примере сложно формационного оруденения (Западная Чукотка) // *Проблемы рудно-формационного анализа и поисковой минералогии на северо-востоке России. Магадан: СВКНИИ ДВО РАН, 1994. С. 73–82.*
- Ahmad S.N., Rose A.W.* Fluid inclusions in porphyry and scarn ore at Santa Rita, New Mexico // *Econ. Geol. 1980. V. 75. P. 229–250.*
- Bodnar R.J., Vityk M.O.* Interpretation of microthermometric data for H₂O–NaCl fluid inclusions // *Fluid inclusions in minerals: methods and applications. Pontignano: Siena, 1994. P. 117–130.*
- Bogdanov K., Filipov A., Kehayov R.* Au–Ag–Te–Se minerals in the Elatsite porphyry-copper deposit, Bulgaria // *Bulg. Acad. Sci. Geochem., Mineral., Petrol. 2005. V. 43. P. 13–19.*
- Bonev I.K., Kerestedjian T., Atanassova R., Andrew C.J.* Morphogenesis and composition of native gold in the Chelopech volcanic-hosted Au–Cu epithermal deposit, Srednogorie, Bulgaria // *Mineral. Deposita. 2002. V. 37. P. 614–629.*
- Brown P.* FLINCOR: a computer program for the reduction and investigation of fluid inclusion data // *Amer. Mineral. 1989. V. 74. P. 1390–1393.*
- Carrillo-Rosúa J., Morales-Ruano S., Morato D. et al.* Mineralogy and geochemistry of El Dorado epithermal gold deposit, El Sauce district, central-northern Chile // *Mineral. Petrol., 2008. V. 92. P. 341–360.*
- Corbett G.J., Leach T.M.* Southwest Pacific rim gold-copper systems: Structure, alteration and mineralization // *Econ. Geol. Spec. Publ. 1998. V. 6. 238 p.*
- Eastoe C.J.* A fluid inclusion study of the Pananguna porphyry copper deposit, Bougainville, Papua New Guinea // *Econ. Geol. 1978. V. 73. P. 721–748.*
- Klemm L.M., Pettke T., Heinrich C.A.* Hydrothermal Evolution of the El Teniente Deposit, Chile: Porphyry Cu–Mo Ore Deposition from Low-Salinity Magmatic Fluids // *Econ. Geol. 2007. V. 102. P. 1021–1045.*
- Kovalenker V.A., Plotinskaya O.Yu., Stanley C.J. et al.* Kurilite – Ag₈Te₃Se – a new mineral from the Prasolovskoe deposit, Kuril islands, Russian Federation // *Mineral. Mag. 2010. V. 74. P. 463–468.*
- LeFort D., Hanley J., Guillong M.* Subepithermal Au–Pd mineralization associated with an alkalic porphyry Cu–Au

- deposit, Mount Milligan, Quesnel Terrane, British Columbia, Canada // *Econ. Geol.* 2011. V. 106. P. 781–808.
- Lowell J.D., Guilbert J.M.* Lateral and vertical alteration-mineralization zoning in porphyry ore deposits // *Econ. Geol.* 1970. V. 65. P. 373–408.
- Moll-Stalcup E.J.* Geochemistry and U-Pb-geochronology of arc related magmatic rocks, northeastern Russia // Abstracts with programs GSA. 1995. V. 27. № 5. P. 65.
- Nash J.T.* Fluid-inclusion petrology – Data from porphyry copper deposits and applications to explorations. Washington: US government printing office, 1976.
- Pašava J., Vymazlova A., Košler J. et al.* Platinum-group elements in ores from the Kalmakyr porphyry Cu–Au–Mo deposit, Uzbekistan: bulk geochemical and laser ablation ICP-MS data // *Miner. Deposita.* 2010. V. 45. P. 411–418.
- Roedder E.* Fluid inclusion studies on the porphyry-type ore deposits at Bingham, Utah, Butte, Montana, and Climax, Colorado // *Econ. Geol.* 1971. V. 66. P. 98–120.
- Sillitoe R.H.* Porphyry copper systems // *Econ. Geol.* 2010. V. 105. P. 3–41.
- Sillitoe R.H., Hedenquist J.W.* Linkages between volcanotectonic settings, ore-fluid compositions, and epithermal precious metal deposits // *Soc. Econ. Geol. Spec. Publ.* 2003. V. 10. P. 315–343.
- Simmons F.A., White N.C., John D.A.* Geological characteristics of epithermal precious and base metal deposits // *Econ. Geol. 100th Anniversary Vol.* 2005. Soc. Econ. Geol., Inc. P. 485–522.
- Tarkian M., Hünken U., Tokmachieva M., Bogdanov K.* Precious-metal distribution and fluid-inclusion petrography of the Elatsite porphyry copper deposit, Bulgaria // *Miner. Deposita.* 2003. V. 38. P. 261–281.
- Tarkian M., Koopman G.* Platinum-group minerals in the Santo Nomas II (Philex) porphyry copper-gold deposit, Luzon Island, Philippines // *Miner. Deposita.* 1995. V. 30. P. 39–47.