DOI: 10.24411/0869-7175-2019-10036

УДК 553.43'536
© В.С.Звездов, 2019

Обстановки формирования крупных и сверхкрупных медно-порфировых месторождений

В.С.ЗВЕЗДОВ (Федеральное государственное бюджетное учреждение Центральный научно-исследовательский геологоразведочный институт цветных и благородных металлов (ФГБУ «ЦНИГРИ»); 117545, г. Москва, Варшавское шоссе, д. 129, корп. 1)

Рассмотрены обстановки формирования и критерии прогноза крупных и сверхкрупных медно-порфировых месторождений. Показано, что для возникновения таких объектов необходимо сочетание специфических геодинамических, структурно-петрофизических, геохимических и иных условий. Наиболее перспективны для поисков крупных месторождений сегменты вулкано-плутонических поясов, на начальных этапах развития которых превалировали режимы интенсивного коллизионного сжатия с перерывом в вулканизме, приводившие к возникновению неглубоко залегающих мощных флюидонасыщенных магматических очагов, «питавших» гипабиссальные и субвулканические рудоносные порфировые интрузивы. Необходимым условием для рудонакопления в значительных масштабах являются благоприятные структурно-петрофизические обстановки, в частности анизотропия интрузивной рамы, приводившая к появлению «структурных ловушек» при разрядке тектонических напряжений, и наличие малопроницаемых экранирующих толщ, способствовавших образованию флюидных плюмов и рудоконцентрации. Определённую роль в формировании крупных месторождений играли также геохимические барьеры, вызывавшие разгрузку гидротермальных растворов, и рудоносность субстрата вулкано-плутонических поясов – древние геохимические ореолы и месторождения различной рудно-формационной принадлежности, подвергавшиеся регенерации в тепловом поле интрузивов с переотложением рудного вещества активизированными метеорными водами на верхних уровнях систем.
Приведённые в статье материалы могут быть использованы для совершенствования геолого-генетических моделей рудно-магматических систем порфирового типа и построенных с их учётом прогнозно-поисковых моделей медно-порфировых рудных полей и месторождений, являющихся основой для проведения поисковых работ.
Ключевые слова: медно-порфировые месторождения, рудно-магматические системы, геодинамические и структурно-петрофизические обстановки, порфировые интрузивы, штокверки, прогноз и поиски.

Звездов Вадим Станиславович
кандидат геолого-минералогических наук



metallogeny@tsnigri.ru

Major and giant porphyry copper deposit formation environments

V.S.ZVEZDOV (Central Research Institute of Geological Prospecting for Base and Precious Metals)

Major and giant porphyry copper deposit formation environments and forecasting criteria are discussed. It is shown that formation of such deposits requires a combination of specific geodynamic, structural-petrophysical, geochemical and other conditions. Volcanoplutonic belt segments are most prospective for major deposit prospecting; their initial evolution stages were dominated by intense collisional compression regimes involving a break in volcanism which led to generation of shallow strong fluid-saturated magmatic chambers that «fed» hypabyssal and subvolcanic ore-bearing porphyry intrusives.These regimes led to formation of shallow strong fluid-saturated magmatic chambers «feeding» hypabyssal and subvolcanic ore-bearing porphyry intrusives. Large-scale ore accumulation depends on favorable structural-petrophysical environments, particularly intrusive enclosing rock anisotropy which resulted in «stratigraphic trap» generation in tectonic stress release, and poorly permeable screening strata helping to form fluid plumes and concentrate ore. Other factors also played a certain role in major deposit formation such as geochemical barriers releasing hydrothermal solutions, and ore potential of volcanoplutonic belt substrate (old geochemical haloes and deposits of various ore formation types that were regenerated in intrusive thermal field involving ore matter redeposition by activated meteoric water at the upper levels of systems.
The materials provided in the paper can be used to improve geological and genetic models of porphyry-type ore-magmatic systems and forecasting-prospecting porphyry copper ore field and deposit models which form the basis for prospecting.
Key words: porphyry copper deposits, ore-magmatic system, geodynamic and structural-petrophysical environments, porphyry intrusives, stockworks, forecasting and prospecting.

Месторождения медно-порфирового семейства являются ведущими в мире как по запасам, так и по добыче Cu и Mo, а также сопутствующих Au, Ag, Re. Среди них известно наибольшее количество гигантских и супергигантских объектов. Промышленное освоение месторождений данного типа требует значительных инвестиций из-за больших запасов руды (сотни миллионов–миллиарды т) при сравнительно невысоких содержаниях металлов. Поэтому поискам крупных объектов, отработка которых была бы экономически целесообразна, всегда уделялось особое внимание. В России за постсоветский период разведаны и поставлены на государственный баланс шесть месторождений медно-порфирового типа, из которых Песчанка, Малмыжское и Ак-Сугское могут быть отнесены к классу крупных. Тем не менее проблема актуальна и в настоящее время, поскольку основными перспективами для обнаружения новых объектов обладают недостаточно экономически развитые регионы Дальневосточного ФО. Одним из направлений её решения является совершенствование геолого-генетических основ прогнозирования, с учётом которых построены прогнозно-поисковые модели рудных районов и полей, с целью модернизации методов и технологий прогноза, поисков и оценки месторождений и, прежде всего, скрытых, то есть не выходящих на дневную поверхность.

Разработки в этом направлении проводились как в СССР и России, так и за рубежом. Проблеме были посвящены монографии и статьи отечественных исследователей [2, 4, 12, 13, 15 и др.], специализированные выпуски журнала «Economic Geology» в 2005 г. и 2010 г., материалы USGS [29, 35 и др.]. В них рассмотрены геодинамические обстановки формирования медно-порфировых месторождений, в том числе крупных и сверхкрупных, частота встречаемости объектов различного ранга (по запасам и содержаниям) в мире в целом, по отдельным металлогеническим провинциям и эпохам, пространственные и генетические связи с месторождениями других формационных типов, термодинамические и физико-химические условия рудообразования, возможные источники гидротермальных растворов и металлов и другие вопросы, связанные с происхождением объектов рассматриваемого типа и принципами их прогноза, поисков и оценки.

Мировая практика геологоразведочных работ последних десятилетий в странах Южной Америки (Чили, Перу, Аргентина, Боливия), Европы (Венгрия, Сербия, Болгария), Азии (Узбекистан, Турция), юго-восточной Азии (Филиппины, Папуа – Новая Гвинея, Индонезия) свидетельствует о генетической связи медно-порфировых месторождений с эпитермальными золоторудными и золото-серебряными. В вулкано-плутонических поясах (ВПП) эти объекты нередко сопряжены в рудно-магматических системах (РМС), часто называемых «порфировыми» или «порфирово-эпитермальными». Медно-порфировые месторождения локализованы во внутренних частях РМС – в эндо-экзоконтактовых зонах гипабиссальных и субвулканических порфировых интрузивов (штоков, даек) или брекчиевых трубках завершающих фаз продуктивных плутоногенных формаций, которые являются апофизами находящихся на глубине крупных массивов. В верхних периферийных частях таких систем, обычно в аргилизированных комагматичных вулканитах, при малом или умеренном уровнях эрозии нередко отмечаются эпитермальные золоторудные (с медью) жильные и стратоидные месторождения HS типа и золото-серебряные, преимущественно жильные, месторождения IS типа [1]. Во фланговых зонах, в фанеритовых интрузивах основных фаз рудоносных формаций или вулканитах, присутствуют мезотермальные золото-полисульфидные жильные месторождения, а при наличии карбонатных толщ – проксимальные Au-Cu- и реже дистальные Pb-Zn-скарновые объекты.

Эпитермальные месторождения и проявления золота и серебра упомянутых типов являются ведущими поисковыми признаками медно-порфировых объектов на глубине. По мнению Д.Кука, П.Холлингса, Г.Корбе, Т.Лича, Р.Силлитоу, Дж.Уолша, Дж.Хеденквиста, М.Эйнауди и др., источником рудного вещества для тех и других служат единые магматические очаги, продуцирующие рудоносные интрузивные и вулканогенные формации, а отмеченная минеральная зональность порфировых РМС обусловлена, прежде всего, термодинамическими и физико-химическими условиями газоотделения в «материнских» плутонах (промежуточных магматических очагах) и их апофизах (порфировых штоках), а также составом вмещающих пород.

В общем виде эволюция металлоносного магматического флюида, отделяющегося от остывающего и кристаллизующегося расплава, описана Р.Силлитоу [34]. В интервале температур 650°–350°С происходит разделение этого флюида на две фазы – сверхсолёный раствор (рассол до 60–70 вес.% NaCl эквивалента), обогащённый Cu, и низко концентрированный пар с Au, Ag. Первый в силу повышенной плотности остаётся в апикальных частях кристаллизующегося интрузива и близ него, вызывая высокотемпературные К-кремниевые (биотит-калишпатовые, биотитовые) изменения (на флангах пропилитовые) и отложение штокверковых медно-порфировых руд. Второй при превышении гидростатического давления над литостатическим поднимается в верхние части систем, где, конденсируясь и смешиваясь с метеорными водами, участвует в эпитермальном рудообразовании. Здесь в зависимости от кислотного потенциала растворов (степени окисления серы – SO_2 или H_2S), который во многом зависит от доли участия метеорных вод, в «пульсационных»

[1]В принятой западными геологами типизации эпитермальных золоторудных месторождений в зависимости от кислотного потенциала рудообразующих растворов: HS – высокой, IS – средней и LS – низкой сульфидизации.

режимах, подобных режимам функционирования современных высокотемпературных геотермальных резервуаров, формируются золоторудные (с медью) жильные и стратоидные месторождения HS типа (в алунитсодержащих аргиллизитах), золото-серебряные, преимущественно жильные, месторождения LS типа (в адуляр-серицитовых метасоматитах) либо объекты «переходного» IS типа.

На более глубинных уровнях РМС при T <350°С возникает однофазная жидкость низкой-умеренной солёности, многооборотная циркуляция которой (с участием метеорной составляющей) вызывает серицит-хлоритовые и серицитовые изменения с отложением существенно пиритовых прожилково-вкрапленных, реже жильных полиметаллических руд. Образуется филлизитовая зона, наложенная на более ранние метасоматиты и руды, а в периферийных зонах – низкотемпературная пропилитовая с рассеянной пиритизацией. Возникают обширные «пиритовые ореолы», являющиеся одним из ведущих поисковых признаков медно-порфировых месторождений. Характерные для филлизитовой зоны стержневые кварц-серицит-пиритовые жилы могут фиксировать переходную зону (с вертикальным размахом до сотен метров) между центральными частями систем с медно-порфировым оруденением и их верхними зонами с эпитермальными золоторудными месторождениями в основном HS типа.

Однако примеров рудообразующих систем, «результирующая» зональность которых полностью соответствовала бы приведённой схеме плотностной сепарации рудоносных растворов, в природе практически нет. Публикации по зарубежным РМС с медно-порфировыми и сопряжёнными с ними (в объёме единых систем) эпитермальными месторождениями и проявлениями золота и серебра, такими как Алмалыкская (Узбекистан), Лепанто (Филиппины), Андаколло, Рефуждио, Потрериллос (Чили), Янакоча (Перу), Речк (Венгрия) и др., свидетельствуют о том, что благороднометалльная минерализация, как правило, локализована в верхних периферийных, а не в осевых частях систем. Для большинства изученных «порфировых» РМС северо-восточных вулкано-плутонических поясов России (Бургачанской, Кавральянской, Танюрер-Канчалинской в Охотско-Чукотском поясе, Центрально-Камчатской, Малетойваямской в Корякско-Центрально-Камчатском, Покровской в Умлекано-Огоджинском, Многовершинной, Уктурской в Восточно-Сихотэ-Алинском и др.) также установлена латеральная рудно-формационная зональность [6, 7]. Более того, для РМС, вмещающих крупные и сверхкрупные медно-порфировые месторождения, присутствие в верхних близповерхностных зонах аргиллизации Au-(Cu) и Au-Ag месторождений вообще не характерно. Практически все гигантские и супергигантские Au-Mo-Cu- и Au-Cu-порфировые месторождения ВПП Тихоокеанского кольца (Чукикамата, Эль Теньенте, Рио Бланко–Лос Бронсес, Ла Эскондида в Чили; Пеббл и др. в США; Ла Гранья, Куахоне в Перу, Грасберг в Индонезии, Фрида Ривер, Ок Теди в Папуа – Новая Гвинея и др.) обладают мощными безрудными аргиллизитовыми «шляпами» при повышенных содержаниях золота в собственно порфировых рудах. Исключение – сравнительно недавно открытое месторождение Уйфу-Голпу (Папуа – Новая Гвинея), на котором зоны золоторудной минерализации HS и IS типов расположены непосредственно над Au-Cu-порфировым штокверком с частичным наложением.

Отмеченные особенности строения РМС, вмещающих крупные и сверхкрупные медно-порфировые объекты, которые должны учитываться при построении их прогнозно-поисковых моделей, обусловлены специфическими геодинамическими обстановками возникновения и становления магматических очагов («материнских» плутонов), структурно-петрофизическими, геохимическими и прочими условиями рудообразования.

Анализ отечественных и зарубежных разработок последних 20 лет, посвящённых генезису медно-порфировых месторождений, показал, что для образования гигантских объектов этого типа необходимо сочетание ряда благоприятных факторов. Среди них:

геодинамические обстановки, при которых возникали ***мощные, неглубоко залегающие, флюидонасыщенные магматические очаги,*** «питавшие» гипабиссальные и субвулканические рудоносные порфировые интрузивы (штоки, рои даек, брекчиевые трубки). Такие обстановки характерны для магматических дуг, мигрировавших в направлении ранее существовавших задуговых (тыловых) бассейнов – структур растяжения и осадконакопления. Крупнообъёмные магматические камеры появлялись в тех сегментах дуг, на начальных стадиях эволюции которых господствовал режим интенсивного коллизионного сжатия, подавлявший вулканизм, и контролировались областями сопряжения парных систем глубинных синседиментационных листрических и крутопадающих поперечных трансформных разломов, где при орогенных взбросо-сдвиговых деформациях возникали линейные, глубоко проникающие магмо- и флюидовыводящие каналы;

петрофизическая гетерогенность интрузивной рамы, обусловливавшая региональную анизотропию полей напряжений с возникновением «структурных ловушек» при их разрядке;

наличие малопроницаемых толщ над рудоносными интрузивами, способствовавших образованию флюидных плюмов и накоплению металлов;

присутствие среди вмещающих пород реакционноспособных карбонатных либо богатых железом базитовых комплексов, игравших роль ***геохимических барьеров,*** которые вызывали разгрузку металлоносных растворов;

рудоносность субстрата ВПП – древние геохимические ореолы и месторождения, подвергавшиеся регенерации в тепловом поле интрузивов с переотложением

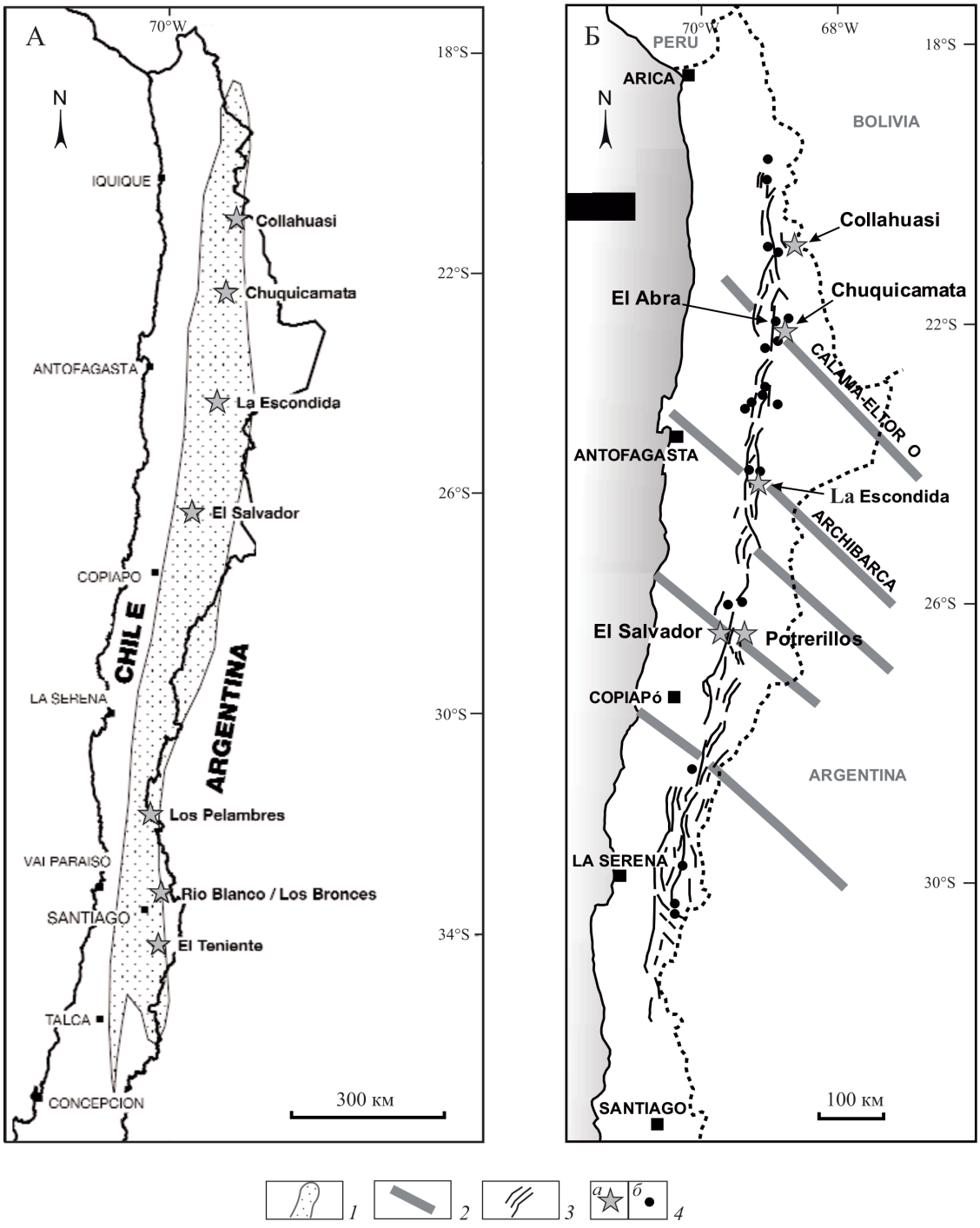


Рис. 1. Геотектоническая позиция крупных и сверхкрупных медно-порфировых месторождений Республики Чили:

А – положение раннетриасового–юрского тылового (задугового) бассейна глубоководного осадконакопления (структуры растяжения), на месте которого в эоцен-олигоценовое и миоцен-плиоценовое время сформировались ВПП с крупнейшими в мире месторождениями медно-порфирового типа [23]; Б – приуроченность гигантских месторождений к местам пересечений внутридуговых разломов надвигового типа (изначально листрических) с зонами крупных трансформных разломов, поперечных по отношению к зонам субдукции, в северо-чилийском сегменте Центрально-Андийского ВПП среднеэоценового–раннеолигоценового возраста [34]; *1* – задуговой (тыловой) бассейн глубоководного осадконакопления; *2* – линеаменты, отражающие трансформные разломы; *3* – внутридуговые разломы; *4* – медно- порфировые месторождения: *а* – гигантские и *б* – крупные и рядовые

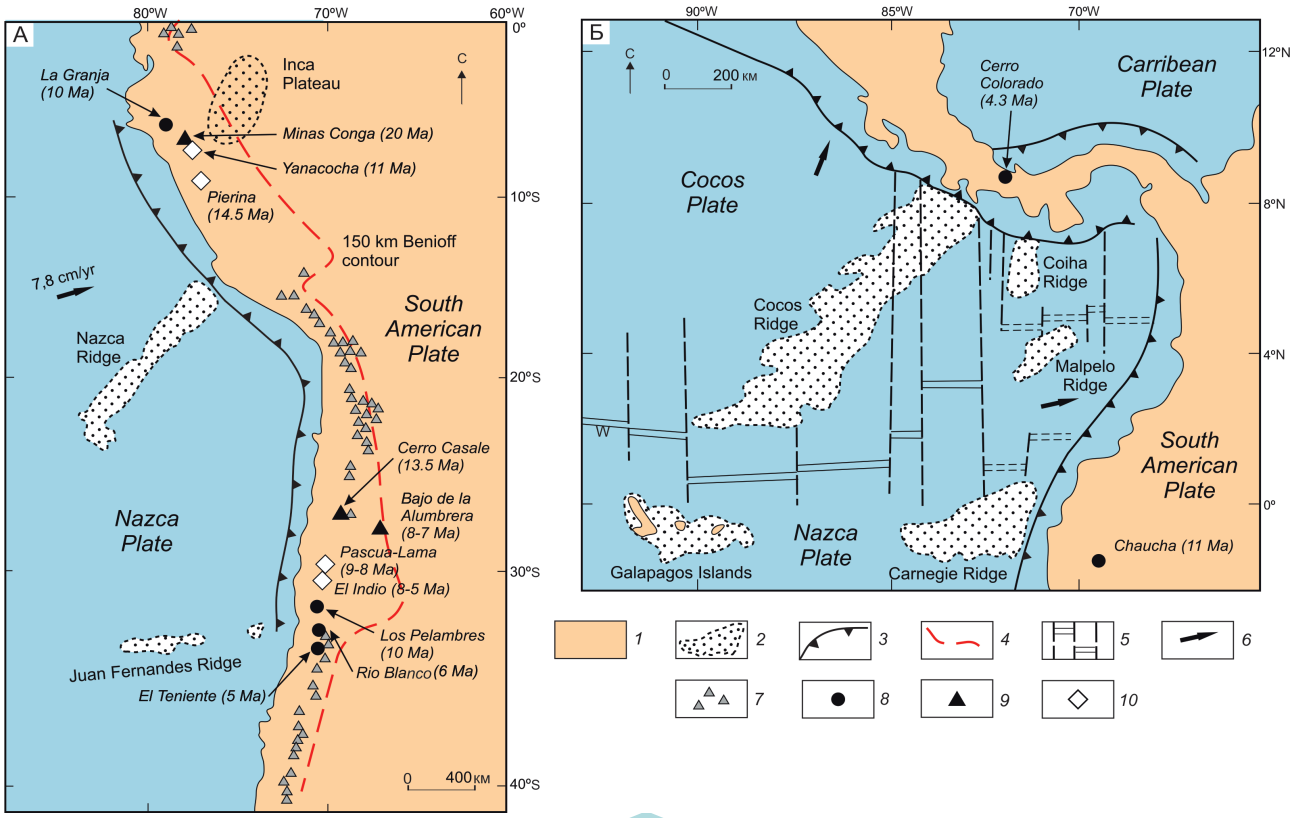


Рис. 2. Сегменты андийских андезитоидных ВПП, сформировавшиеся при пологой субдукции океанических хребтов и плато под континентальную окраину. *По работе* [19]*, с изменениями:*

основные тектонические элементы строения западной окраины южноамериканского континента и Центральной Америки и положение молодых (<20 млн. лет) Cu-Mo-, Au-Mo-Cu-порфировых и золоторудных месторождений HS типа на территории Чили и Перу (А), Панамы, Колумбии и Эквадора (Б); *1* – континентальная окраина; *2* – асейсмичные океанические хребты Nazca, Juan Fernandes Ridge, Cocos Ridge и др. и плато Inca, субдуцированные под континентальную плиту; *3* – зона субдукции (океанические желоба); *4* – проекция поверхности зоны Беньоффа до глубины 150 км; *5* – системы глубинных разломов; *6* – направления дрейфа литосферных плит; *7* – активные вулканы; *8–10* – крупные и сверхкрупные месторождения: *8* – Cu-Mo- порфировые, *9* – Au-Mo-Cu-порфировые, *10* – Au-(Cu)- и Au-Ag-рудные HS и IS типов

рудного вещества активизированными метеорными водами на верхних уровнях рудогенерирующих систем.

Магматические дуги, «накатывающиеся» (мигрирующие) в направлении ранее существовавших задуговых (тыловых) бассейнов – структур растяжения и осадконакопления, наиболее ярко проявлены в Северной и Южной Америке. Это кордильерские и андийские ВПП, «омолаживающиеся» в направлении вглубь континентов. Для них характерны многократные металлогенические циклы образования порфировых руд. Типичный пример – чилийские Анды, где имеются пять «металлоносных» ВПП и сосредоточены крупнейшие в мире медно-порфировые объекты – Эль Теньенте, Чукикамата, Коллахаузи, Ла Эскондида, Лос Пеламбрес, Рио Бланко–Лос Бронсес, Эль Абра, Эль Сальвадор. Эти пояса эоцен-олигоценового и миоцен-плиоценового возраста сформированы на субстрате раннетриасового–юрского тылового (задугового) бассейна глубоководного осадконакопления (структуры растяжения), фиксирующегося субмеридиональной полосой распространения морских отложений шириной до 120 км (рис. 1, А). Названные месторождения приурочены к местам ***пересечений внутридуговых разломов надвигового типа (изначально листрических) с зонами крупных трансформных разломов, поперечных по отношению к зонам субдукции*** (см. рис. 1, Б). В этих областях (в местах перегибов, флексур или пересечения разломов) при разрядке сжимающих тектонических напряжений в результате взбросо-сдвиговых деформаций возникали глубоко проникающие каналы, по которым магматические расплавы и флюиды поднимались в верхнюю часть земной коры.

Мощные флюидонасыщенные магматические очаги на небольших глубинах возникали в ***режиме интенсивного регионального сжатия, с перерывом в вулканизме,*** на отдельных участках ВПП Тихоокеанского

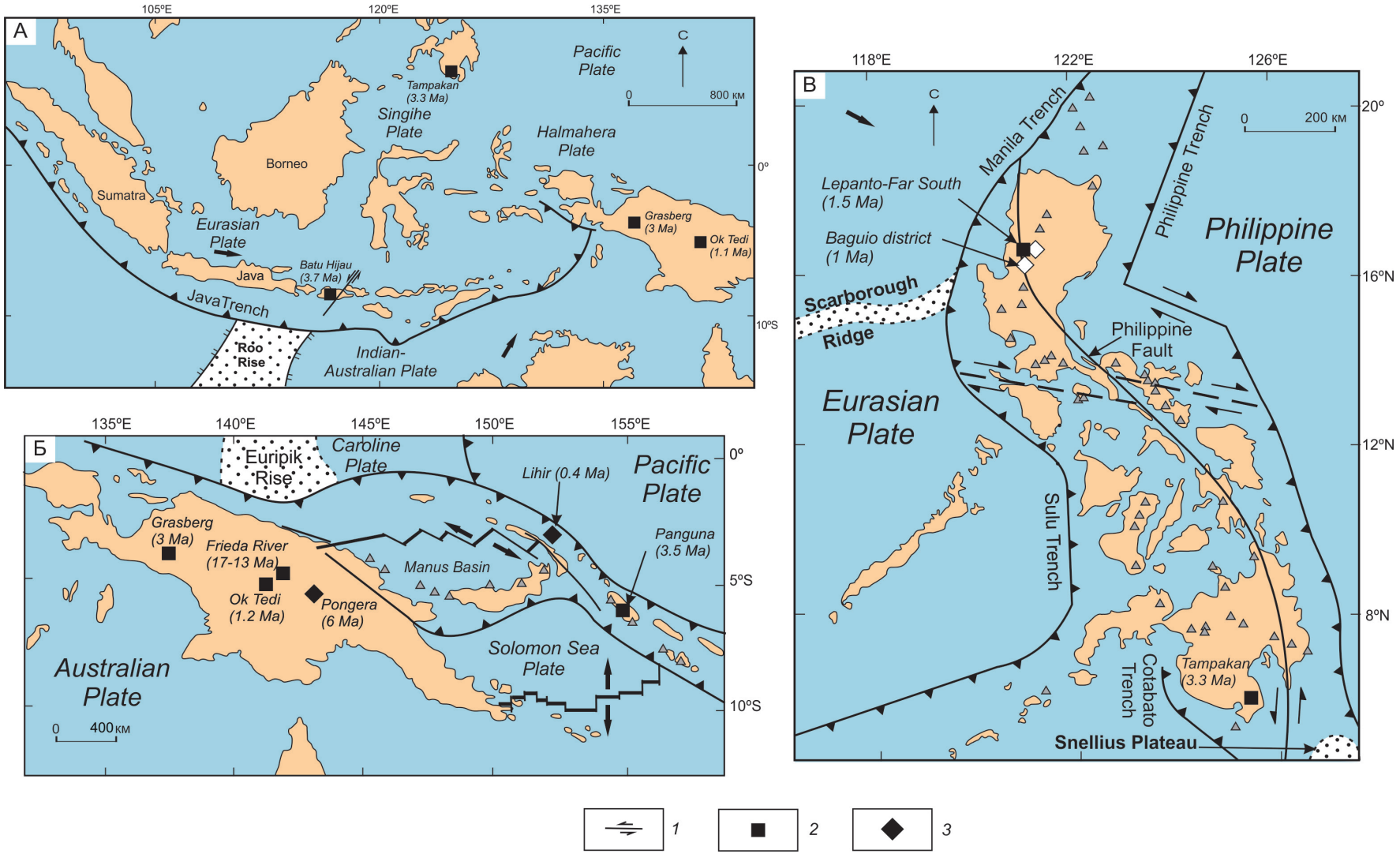


Рис. 3. Сегменты базальтоидных ВПП юго-восточной Азии, сформировавшиеся при пологой субдукции океанических хребтов и плато под островные дуги. *По работе* [19], *с изменениями*:

основные тектонические элементы строения территории Индонезии и южных Филиппин (А), Папуа Новой Гвинеи, Ириан Ява и Соломоновых островов (Б), Филиппин (В); показано положение субдуцирующих океанических плато Roo, Euripik, Snellius и хребта Scarborough; *1* – зоны глубинных разломов сдвигового типа; *2–3* – крупные и сверхкрупные месторождения: *2* – Au-Cu-порфировые, *3* – Au-Ag-рудные LS типа; см. услов. обозн. к рис. 2

кольца – кордильерских (Запад США), андийских (Перу, Чили, Панама) (рис. 2), новогвинейских, индонезийских (рис. 3), а также Тетиса, Монголо-Охотского и других поясов. Об этом свидетельствует анализ геотектонической позиции 42 крупнейших Cu-Mo-, Au-Mo-Cu- и Au-Cu-порфировых месторождений мира [19]. Не менее половины из них сосредоточены в сегментах ВПП, на начальных стадиях формирования которых господствовал режим интенсивного коллизионного сжатия при пологой субдукции асейсмичных океанических хребтов и плато под островные дуги и континентальные окраины. Такие условия способствовали утолщению земной коры, выплавлению известково-щелочных магм при взаимодействии с астеносферой, насыщению их летучими веществами за счёт субдуцирующих океанических плит, мантийного клина (слэба) и дегидратации металлоносных осадков, что в итоге приводило к появлению окисленных расплавов, способных к переносу Cu, Au, SO_2 [28, 33]. Давление препятствовало подъёму магмы в верхние части земной коры, то есть «подавляло» вулканизм, приводя к возникновению крупных магматических камер (промежуточных очагов) на небольших глубинах (5–15 км), в которых скапливались большие объёмы отделявшихся от кристаллизующихся расплавов металлоносных флюидов. Кроме того, сжатие ограничивало количество апофиз в кровле магматической колонны, обеспечивая сосредоточение флюидов в апикальной зоне единого крупного плутона, а не в нескольких мелких.

Состояние «неустойчивого равновесия» подобных систем с небольшим, но варьирующим по интенсивности флюидным потоком, отражающим кинетически медленные процессы газоотделения и дренирования всё более глубинных частей остывающих и кристаллизующихся «материнских» гранитоидных батолитов, могло продолжаться до нескольких миллионов лет. На дневной поверхности магматические очаги проявлялись слабой вулканической и фумарольной активностью. Медно-порфировые же месторождения формировались сравнительно быстро, по разным оценкам от ≤100 тыс. лет [32] лет до первых сотен тыс. лет [34, 36 и др.] на небольших глубинах (2–5 км), куда поднимались флюиды, отделявшиеся от охлаждающихся и кристаллизующихся плутонов (магматических очагов).

Возможными триггерами (спусковыми механизмами), вызывавшими «вскрытие» магматических камер с катастрофичными по масштабам декомпрессией и выбросом флюидной фазы, могли быть надвиговые (взбросо-сдвиговые) деформации с разрядкой тектонических напряжений, сопровождаемые сильными землетрясениями, обрушение вулканических сооружений, а также эрозия земной коры, приводившая к превышению гидростатического давления над литостатическим.

Перечисленные процессы приводили как к масштабным эксплозивным вулканическим извержениям (с «распылением» рудного вещества) в случае взламывания вскрыши, так и к возникновению рудогенерирующих гидротермальных систем, которые продуцировали медно-порфировые месторождения, если имелись препятствия к достижению флюидным потоком дневной поверхности [32]. Во втором случае возникали порфировые интрузивы – апофизы находящихся на глубине крупных плутонов (промежуточных магматических очагов), часто трубки эксплозивных брекчий, а также каркасы мелкой взрывной трещиноватости (из-за явлений гидроразрыва), по которым поднимались металлоносные флюиды и циркулировали гидротермальные растворы. Причём обстановки с положением рудоносных порфировых интрузивов непосредственно под вулканами были не благоприятны для формирования промышленно значимых медно-порфировых объектов.

Принципиальная модель становления «материнского» полифазного плутона для медно-порфировых систем предложена Р.Силлитоу [33]. Она включает: зоны последовательной кристаллизации магматического тела (фанеритовые фазы); «инкапсулированные» области остаточного расплава, «питающие» раннюю, среднюю и позднюю рудоносные порфировые фазы, представленные вертикально вытянутыми (>3 км) штоками-апофизами; «литоидную оболочку» (аргиллизитовую «шляпу») в ранее накопившихся комагматичных вулканитах (рис. 4). Из модели следует, что при наличии нескольких разобщённых порфировых штоков возможно образование группы рудообразующих систем. Очевидно, что каждая из них будет обладать «собственной» зональностью вокруг отдельных магматических тел.

Спецификой РМС, вмещающих медно-порфировые месторождения-гиганты, является то обстоятельство, что на раннем этапе их развития режим интенсивного регионального сжатия наряду с «экранирующими» перекрывающими толщами (их влияние будет описано ниже) препятствовал проникновению золотоносных флюидов в верхние зоны систем. Для сформировавшихся в таких условиях гигантских и супергигантских Au-Mo-Cu- и Au-Cu-порфировых месторождений ВПП Тихоокеанского кольца, как было отмечено выше, характерны мощные безрудные аргиллизитовые «шляпы» при повышенных содержаниях золота в собственно порфировых рудах, сосредоточенных в эндо-экзоконтактовых зонах рудоносных интрузивов, в то время как на рядовых объектах в близповерхностной области интенсивных аргиллизитовых изменений нередко присутствуют Au-(Cu)- и Au-Ag месторождения HS и IS типов.

Крупные и сверхкрупные месторождения сопряжены с многофазными интрузивами, строение которых отражает дискретное поступление расплава из магматических очагов, функционировавших сотни тысяч–первые миллионы лет. Для таких объектов характерно наличие нескольких порфировых фаз (штоков, даек, брекчиевых трубок), каждая из которых сопровождается «своей»

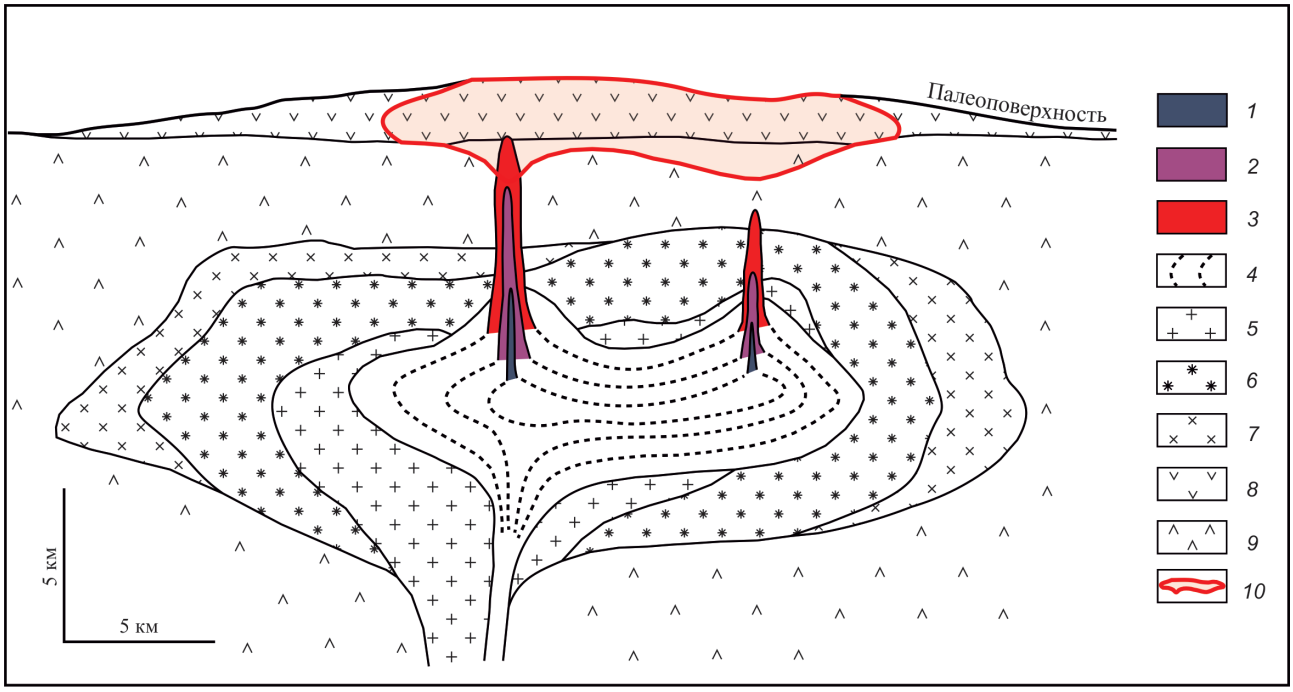


Рис. 4. Принципиальная схема становления «материнского» полифазного плутона (промежуточного магматического очага) для медно-порфировых систем [35]:
1–3 – порфировые фазы: *1* – поздняя, *2* – средняя, *3* – ранняя; *4* – зоны становления (охлаждения, дегазации и кристаллизации) магматического тела; *5–7* – фанеритовые фазы: *5* – поздняя, *6* – средняя, *7* – ранняя; *8* – комагматичные вулканогенные породы; *9* – субвулканический субстрат; *10* – «аргиллизитовая шляпа»

минерализацией, хотя отложение основной массы руд обычно связано со становлением интрузивов одной, реже двух из них. Их морфология и определяет форму рудных тел. Многостадийность рудоотложения выражается в многочиленных рудообразующих минеральных ассоциациях, что нетипично для рядовых объектов.

Возможная форма, объём и время кристаллизации крупного магматического тела (очага), со становлением которого связано формирование гигантского Au-Mo-Cu-порфирового месторождения Бингхэм в штате Юта, США, описаны в работе И.Штейнберга с соавторами [36]. На основе объёмного моделирования по данным магнитной съёмки и разведочного бурения ими предполагается лакколитоподобная морфология монцонитового плутона с несколькими волнообразными выступами-апофизами (порфировыми штоками), ориентированными в восток-северо-восточном направлении. Не выходящий на дневную поверхность «материнский» интрузив фиксируется обширной положительной аэромагнитной аномалией на фоне полей с пониженными и отрицательными значениями магнитной восприимчивости вмещающих осадочных пород, а находящееся на северо-восточном фланге системы месторождение, приуроченное к штоку кварцевых монцонит-порфиров, отрицательной аномалией за счёт разложения акцессорного магнетита в результате околорудных гидротермально-метасоматических изменений (рис. 5).

В построенной трёхмерной модели морфологии плутона с дайкообразным «питающим» магматическим каналом и выступами-апофизами, с одним из которых сопряжено месторождение Бингхэм (рис. 6), средняя мощность интрузива оценивается от 2,0 до 3,5 км (его кровля вскрыта нижними горизонтами действующего карьера), а объём от 1400 до 3000 км^3. При принятом среднем значении объёма в 2000 км^3 расчётное время кристаллизации плутона около 230 000 лет. Сопоставление теплофизических расчётов с высокоточными геохронологическими и петрологическими данными свидетельствует о том, что около 1000 км^3 магмы было «инкапсулировано» в ходе кристаллизации интрузии при затвердевании дорудных фанеритовых фаз монцонитов и завершении экструзивного вулканизма. Этот «остаточный» объём водонасыщенного расплава содержал до 150 млрд. т магматической воды, что, по мнению автора статьи, более чем достаточно для отложения всего объёма рудоносного кварцевого штокверка.

Мелкие и средние по запасам Au-Mo-Cu- и Au-Cu-порфировые месторождения третичных андезит-дацитовых островных дуг (ВПП Тихоокеанского кольца, Тетиса, Карпато-Балканской и других минерагенических провинций) сформировались в ***режиме слабого (до нейтрального) растяжения*** [19, 34]. Они локализованы во внутренних частях порфировых РМС, в верхних периферийных зонах которых, в близповерхностной

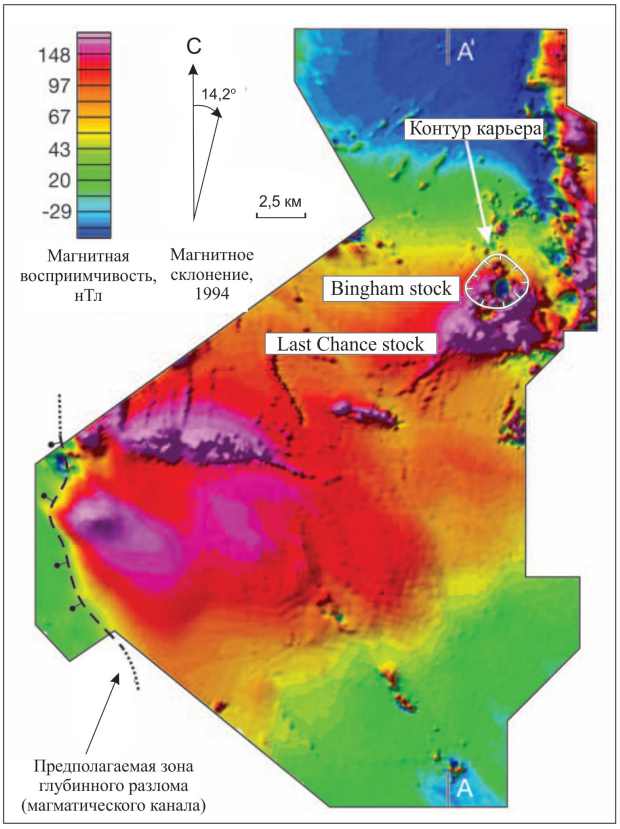


Рис. 5. Аэромагнитная аномалия, вызванная скрытым лаколитоподобным плутоном, к одному из выступов-апофиз которого приурочено гигантское Au-Mo-Cu-порфировое месторождение Бингхэм, штат Юта, США [36]

зоне интенсивных аргиллизитовых изменений, нередко присутствуют Au-Cu- и Au-Ag месторождения HS и IS типов со стратоидными и жильными рудами. Последние являются продуктами разгрузки металлоносных флюидов, отделившихся от тех же магматических очагов, что и высококонцентрированные гидротермальные растворы (рассолы), участвовавшие в отложении медно-порфировых руд. Примеры подобных систем: Лепанто, Баджио (Филиппины), Андаколло, Рефуждио (Чили), Янакоча (Перу), Речк (Венгрия), Бор (Сербия), Кёплер (Турция), Озерновская, Авачинско-Китхойская, Малетойваямская (Россия).

Около- , меж- и задуговые обстановки с базальт-риолитовым вулканизмом и постколлизионные рифты с щелочным магматизмом с ***режимами регионального растяжения*** не благоприятны для возникновения промышленных медно-порфировых объектов. В верхних частях распространённых здесь РМС типа «интрузив под вулканом» локализованы эпитермальные, преимущественно жильные Au-Ag месторождения LS типа (до 60% мировых запасов Au) и Au-Te объекты. Примеры месторождений: Лихир, Ладолам, Поргера в Папуа – Новая Гвинея, Слиппер, Буллфрог, Крипл Крик, Раунд Моунтин в США, Балейское, Тасеевское, Многовершинное, Покровское, Желтулакское, Буриндинское, Прогнозное и др. в России. В глубинных частях отдельных РМС известны мелкие проявления Au-Cu- и Au-Mo-Cu-порфировых руд. На некоторых объектах (Многовершинное, Нявленга, Джульетта) ареалы развития золото-серебряных и Au-Mo-Cu-порфировых руд совмещены в пространстве [6, 7].

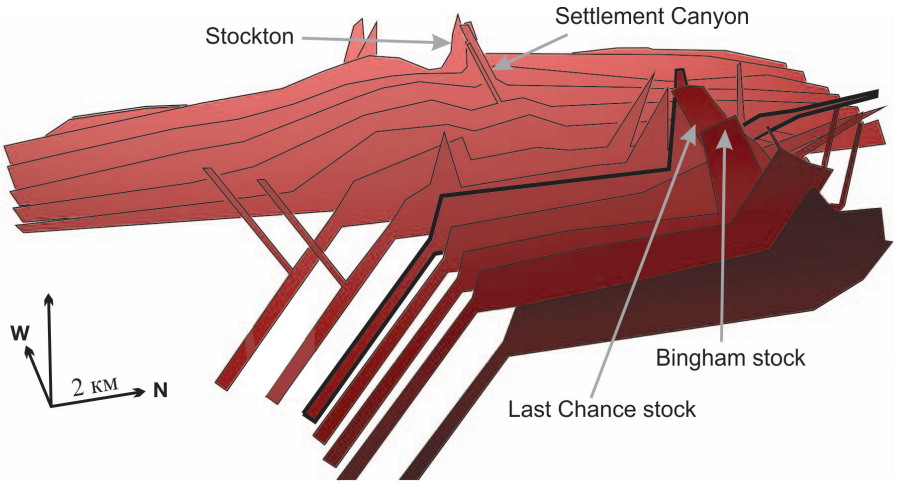


Рис. 6. Трёхмерная модель «материнского» плутона, с которым связано формирование Au-Mo-Cu-порфирового месторождение Бингхэм, штат Юта, США [35]:

модель состоит из двухмерных моделей-разрезов по профилям через 1–2 км; средняя мощность лакколитоподобного плутона – от 2,0 до 3,5 км (его кровля вскрыта на нижних горизонтах действующего карьера); подошва – на 3000 м от уровня моря; показаны дайкообразный «питающий» магматический канал и выступы-апофизы, к наиболее крупному из которых приурочено месторождение Бингхэм

Геодинамическими обстановками, влиявшими на размеры возникавших магматических камер (очагов) и объёмы отделявшихся от них металлоносных флюидов и растворов, от которых, несомненно, зависели масштабы формирующихся месторождений, не исчерпываются условия, необходимые для возникновения крупных объектов. Как справедливо отмечено рядом исследователей [19, 34 и др.], восходящий из магматического очага мощный флюидный поток в отсутствии благоприятных локальных геолого-структурных условий может привести к образованию лишь обширных геохимических аномалий с низкими содержаниями металлов.

Одним из факторов, определявших условия рудоотложения и вероятность образования крупных месторождений, является ***петрофизическая гетерогенность интрузивной рамы и, прежде всего, субстрата (фундамента) ВПП*** – наличие «жёстких» блоков либо пластично деформирующихся толщ, обусловливавших анизотропию полей напряжений, которая проявлялась в стилях и интенсивности деформаций пород при коллизии, предопределяла условия внедрения, дегазации и кристаллизации расплавов, приводила к возникновению «структурных ловушек». Присутствие над магматическими очагами малопроницаемых («экранирующих») толщ способствовало появлению магматических и(или) флюидных плюмов, то есть обстановок, благоприятных для концентрации металлов.

К подобным «компетентным» толщам в субстрате кайнозойских ВПП Новой Гвинеи, с плутоногенными формациями которых сопряжены Au-Cu-порфировые месторождения-гиганты Грасберг, Ок Теди и Фрида Ривер, П.Гоу и Дж.Уолшем [23], отнесены третичные известняки формации Дарай/Менди, перекрывающие мезозойские обломочные породы формаций Йери и Чим, а в фундаменте поясов центральной части Чили с такими уникальными по запасам Cu-Mo-порфировыми объектами, как Эль Теньенте, Рио Бланко–Лос Бронсес, – миоценовые андезитовые лавы формации Фареллонес, перекрывающие олигоценовую толщу переслаивающихся песчаников, алевролитов и туфобрекчий формаций Абанико и Гойя Мачали. При коллизионном сжатии разрядка тектонических напряжений в верхних частях разрезов происходила в основном по подошве компетентных слоёв с возникновением срывов надвигового типа, в то время как в более хрупких нижележащих слоях происходило интенсивное складкообразование, возникали многочисленные трещины и разломы преимущественно сколового типа, по которым проникали рудоносные расплавы. Таким образом, толщи известняков, склонных к пластичным деформациям при высоких температурах и давлении, и вулканитов с повышенной прочностью влияли на уровень подъёма расплавов. Рудоносные порфировые интрузивы обычно локализованы ниже таких толщ, игравших роль своеобразных структурно-петрофизических экранов для магмы и отделяющихся от неё флюидов, либо на тех же гипсометрических уровнях.

Подобные обстановки существовали не только в поясах Юго-Восточной Азии и Южной Америки, но и в вулкано-плутонических поясах Северной Америки, Европы, Азии. Признаки влияния экранирующих толщ на рудогенез отмечаются как на месторождениях-гигантах, таких как Бингхэм, Санта Рита (США), Алмалык (Узбекистан), так и на рядовых объектах – Речк (Венгрия), Кызата, Сары-Чеку, Нижнекаульдинское (Узбекистан), Цаган-Субурга, Хармагтай (Монголия), Златно (Чехия), Майданпек (Сербия) и др. В верхних частях рудовмещающих разрезов этих месторождений присутствуют пластично деформирующиеся, малопроницаемые для гидротермальных растворов карбонатные (известняки, доломиты, мергели) либо существенно глинистые толщи, слагающие кровлю рудоносных интрузивов и(или) ксенолиты различных (до гигантских) размеров. В вулкано-плутонических поясах с преимущественно сиалическим фундаментом «экранирующее» воздействие, способствующее концентрации металлов, могли оказывать породы с высокими прочностными свойствами, такие как рифейско-раннекембрийские гнейсы и амфиболиты, в виде останцов присутствующие в провисах кровли рудоносного интрузива крупного Cu-Mo-порфирового месторождения Эрдэнтуин-Обо (Монголия).

Подэкранные обстановки при коллизионном региональном сжатии способствовали образованию магматических и флюидных плюмов и накоплению металлов в верхних (головных) частях магматических колонн. При инверсии (релаксации) тектонических напряжений и декомпрессии происходил неоднократный «прорыв» расплава и отделяющихся от него газов в вышележащие толщи. Возникали порфировые интрузивы нескольких фаз и сопряжённая с ними медно-порфировая минерализация. При наличии перекрывающих карбонатных толщ они в значительных масштабах ассимилировались магматическим расплавом с образованием гибридных пород, таких как сиенито-диориты на сверхкрупном Алмалыкском месторождении [2] с запасами: Cu – 23 млн. т (при среднем содержании 0,39%), Mo – 140 тыс. т (0,002%), Au – 2,2 тыс. т (0,37 г/т), Ag – 13,4 тыс. т (2,2 г/т)[22] в Узбекистане и «гибридные кварцевые монцониты» на гигантском месторождении Бингхэм [24] с запасами: Cu – 28,5 млн. т (0,88%), Mo – 1,71 тыс. т (0,053%), Au – 1227 т (0,38 г/т), Ag – 10,7 тыс. т (3,3 г/т) в штате Юта, США. «Останцы» – провисы кровли и ксенолиты известняков и доломитов мраморизованы, скарнированы, на контактах с рудоносными интрузивами обогащены золотом, но в целом безрудны.

[2]Здесь и далее запасы зарубежных месторождений и средние содержания металлов в рудах, при которых они подсчитаны, приведены по базе данных USGS 2008 г. [35].

Гипсометрический уровень подъёма расплава, то есть вертикальная протяжённость порфировых интрузивов (обычно до первых километров), зависел от состава и флюидонасыщенности магмы, влиявших на её вязкость и, соответственно, скорость подъёма, и, конечно же, от объёма (энергетического потенциала) магматического очага. Завершающие «рудоносные» порции расплава (порфировые фазы) обычно внедрялись в благоприятные для хрупких деформаций фанеритовые породы главных фаз плутонов, включая их «гибридные» разности, и поднимались выше, взламывая и ассимилируя вышележащие породы, включая малопроницаемые.

При охлаждении, дефлюидизации и кристаллизации рудоносных порфировых интрузивов в результате явлений гидроразрыва, контракции и сопряжённого с ними обрушения пород надынтрузивной кровли (с приоткрыванием более древних трещин) образовывались системы (каркасы) мелкой густой трещиноватости, по которым в тепловом поле магматических тел развивалась широкомасштабная многооборотная циркуляция магматогенных рудоносных флюидов и активизируемых метеорных вод. Такие условия способствовали выносу металлов с нижних уровней систем на верхние с их интегральным накоплением. Источниками рудного вещества наряду с магматическими очагами могли быть породы интрузивной рамы, например, гранитоиды главных фаз плутоногенных формаций с надфоновыми содержаниями металлов, а также более древние стратиформные полиметаллические, медно-цинково-колчеданные и иные месторождения субстрата ВПП, подвергшиеся регенерации в тепловом поле интрузивов.

В итоге формировались штокверки значительных размеров и вертикального размаха, внешние границы которых максимально удалены от контактов порфировых тел. Для них характерны отчётливая концентрическая зональность, сравнительно невысокие содержания металлов, широкомасштабные надрудные геохимические ореолы. При этом основные запасы вкрапленно-прожилковых руд обычно сосредоточены в надынтрузивных зонах. Геометрически, в первом приближении, эти штокверки и выделенные в их пределах по промышленным кондициям рудные тела могут быть описаны сочетанием разновысоких, вложенных друг в друга параболоидов вращения, полыми конусами или цилиндрами, крутопадающими пластинами и клиньями. Такими морфологическими особенностями обладает большинство медно-порфировых объектов. В качестве примера на рис. 7 приведены разрезы месторождения Бингхэм, форма рудного тела которого геометрически подобна усечённому полому конусу.

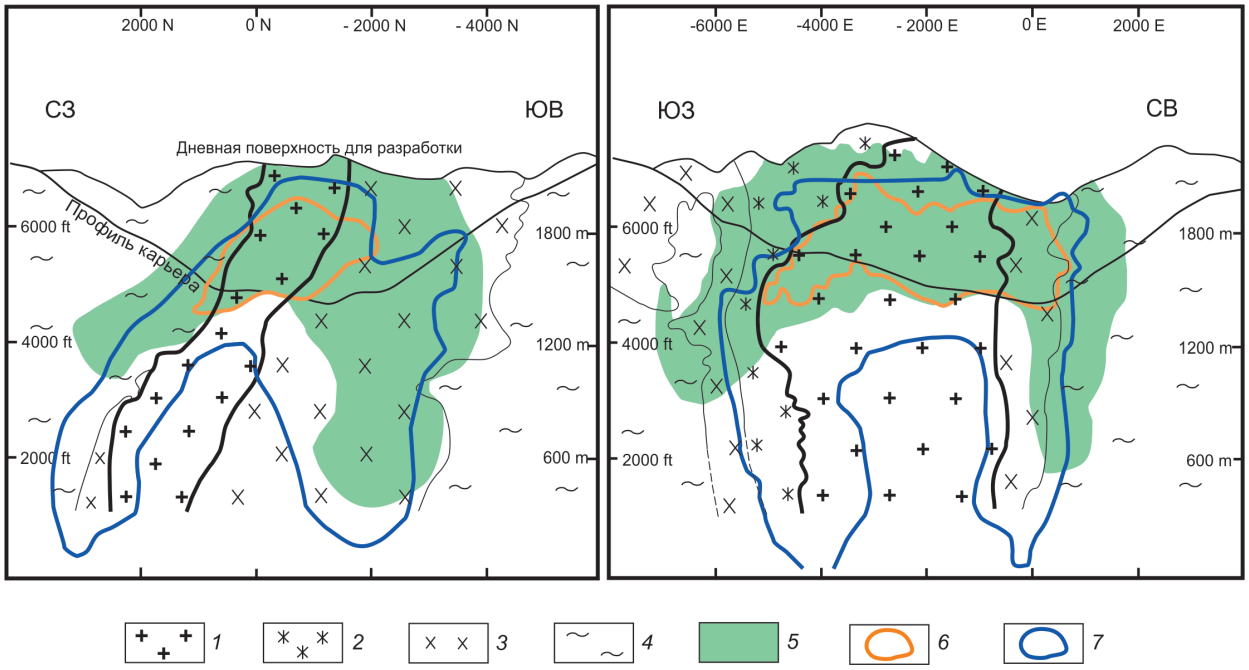


Рис. 7. Геологические разрезы Au-Mo-Cu-порфирового месторождение Бингхэм, штат Юта, США [24]:

1–4 – рудовмещающие породы: *1* – кварцевые монцонитовые порфиры, *2* – «гибридные» кварцевые монцониты, *3* – равномернозернистые монцониты, *4* – осадочные породы, нерасчленённые; *5–7* – медно-, молибденово- и золоторудные тела, оконтуренные по бортовому содержанию: *5* – Cu – 0,15%, *6* – MoS_2 – 0,02% и *7* – Au – 0,30 г/т

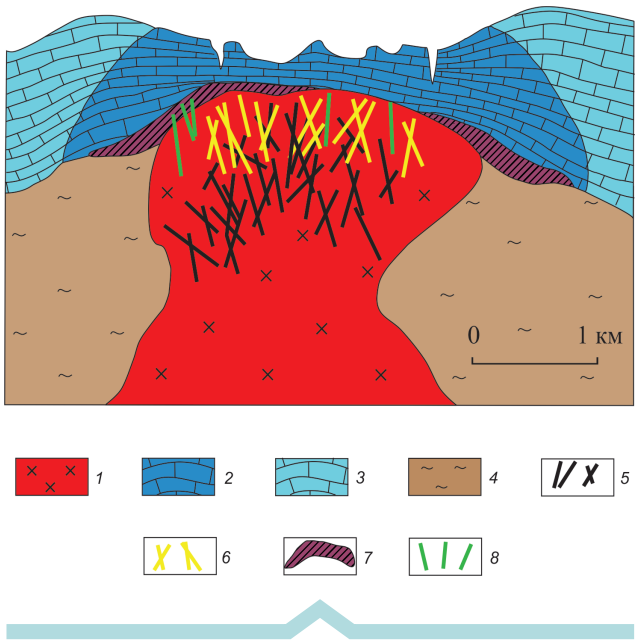


Рис. 8. Геологический разрез Au-порфирового месторождения Кёплер, Турция [27]:

1 – рудоносный полифазный интрузив (гранодиорит-порфиры, диоритовые порфириты); *2–4* – вмещающие породы: *2* – мрамора, *3* – известняки, *4* – метаморфизованная песчано-сланцевая толща; *5–9* – рудная минерализация: *5* – медно-порфировая (кварц-магенетит-сульфидные прожилки) ранней стадии рудоотложения, *6–7* – золото-полисульфидная IS типа (главная продуктивная) средней стадии: *6* – карбонат-полисульфидные прожилки с Au, *7* – золотоносные метасоматические залежи типа «манто» того же минерального состава; *8* – прожилки «сажистого» пирита с тонким золотом поздней стадии

В варианте, когда магматический расплав «достигал» малопроницаемой карбонатной толщи, частично ассимилировал, но не прорывал её полностью, формировались изометричные в плане и лакколитообразные в разрезе порфировые интрузивы. Сопряжённые с ними штокверки и оконтуренные в их объёмах по промышленным кондициям рудные тела имеют линзовидную, пласто- либо грибообразную форму и охватывают в основном внутриинтрузивные зоны. Примерами таких месторождений, для которых характерны совмещение в минерализованном пространстве разновозрастных рудообразующих ассоциаций и повышенные содержания металлов в рудах, являются как рядовые по запасам объекты – скрытое Au-Mo-Cu-порфировое месторождение Кызата (Cu – 2 млн. т (0,85%)) [5], его выведенная сбросо-сдвигом (с амплитудой перемещения около 1,5 км) на дневную поверхность часть Сары-Чеку (Cu – 0,5 млн. т (0,49%)), рудопроявление Нижнекаульдинское в Узбекистане, так и крупные, такие как Au-Cu-порфировое месторождение Ок Теди (Cu – 5 млн. т (0,76%), Au – 490 т (1,1 г/т)) в Папуа – Новая Гвинея, (Cu)-Au-порфировое месторождение Кёплер (Au – 209 т (1,7 г/т), Ag – 590 т (4,8 г/т)[3]) в Турции (рис. 8).

К этому же морфологическому типу объектов, но образовавшихся под мощной вулканогенной толщей (формации Фаррелонес и её аналогов), можно отнести чилийские супергигантские Cu-Mo-порфировые месторождения: плитообразный штокверк Рио Бланко (запасы вместе с участком Сур-Сур (оруденелой брекчиевой трубкой): Cu – 40 млн. т (0,95%), Mo – 0,95 млн. т (0,019%), и, предположительно, Чукикамата (с запасами Cu при разных бортовых содержаниях от 92 млн. т (при среднем 1,2%) до 111 млн. т (0,65%), Mo – 6,84 млн. т (0,04%) с плащеобразной формой полого залегающего рудного тела в продольном разрезе и клиновидной, сужающейся с глубиной в поперечных сечениях (рис. 9).

Если перекрывающая толща сложена породами с повышенными прочностными свойствами, но склонными к хрупким деформациям, избыточное давление газов, отделявшихся от охлаждающихся магматических тел, могло привести к неоднократному прорыву флюидов и взрывному растрескиванию вмещающих пород с образованием эруптивных брекчий. В целом они характерны для многих медно-порфировых месторождений, являясь следствием «вторичного вскипания» (потери летучих) расплава при кристаллизации, однако, в рассматриваемой обстановке названные процессы приобретали катастрофические масштабы. В результате возникали многофазные, сложно построенные, крупные брекчиевые трубки, вмещающие значительные объёмы руд. Среди обломков брекчий часто присутствуют рудокласты ранних минеральных ассоциаций, а в цементе рудные минералы – пирит, халькопирит, борнит, блёклые руды и др. более поздних ассоциаций. Причём на крупных объектах обычно отмечается несколько фаз брекчирования, хотя основной рудоносной (как и для порфировых фаз), как правило, является одна.

Сформированные в таких условиях рудоносные штокверки могут иметь трубообразную (цилиндрическую), воронкоподобную либо сложную комбинированную форму, зависящую от морфологии брекчиевых трубок и порфировых интрузивов. Брекчиевые тела могут «надстраивать» верхние апикальные части рудоносных порфировых штоков, как на месторождении Дос Побрес (США), либо представлять собой самостоятельные образования, как на сверхкрупном объекте Рио Бланко–Лос Бронсес (Чили), четверть запасов которого (Cu 10 млн. т с содержанием >1,0%) сосредоточена в сложнопостроенной (по типу цемента выделено 7 типов брекчий) эксплозивно-гидротермальной трубке Сур-Сур, имеющей форму перевёрнутого конуса (эллипсоида на дневной поверхности с размерами 3000×700 м) с прослеженным вертикальным размахом до 1700 м.

[3]Прогнозные ресурсы (measured and indicated resources) по работе [27].

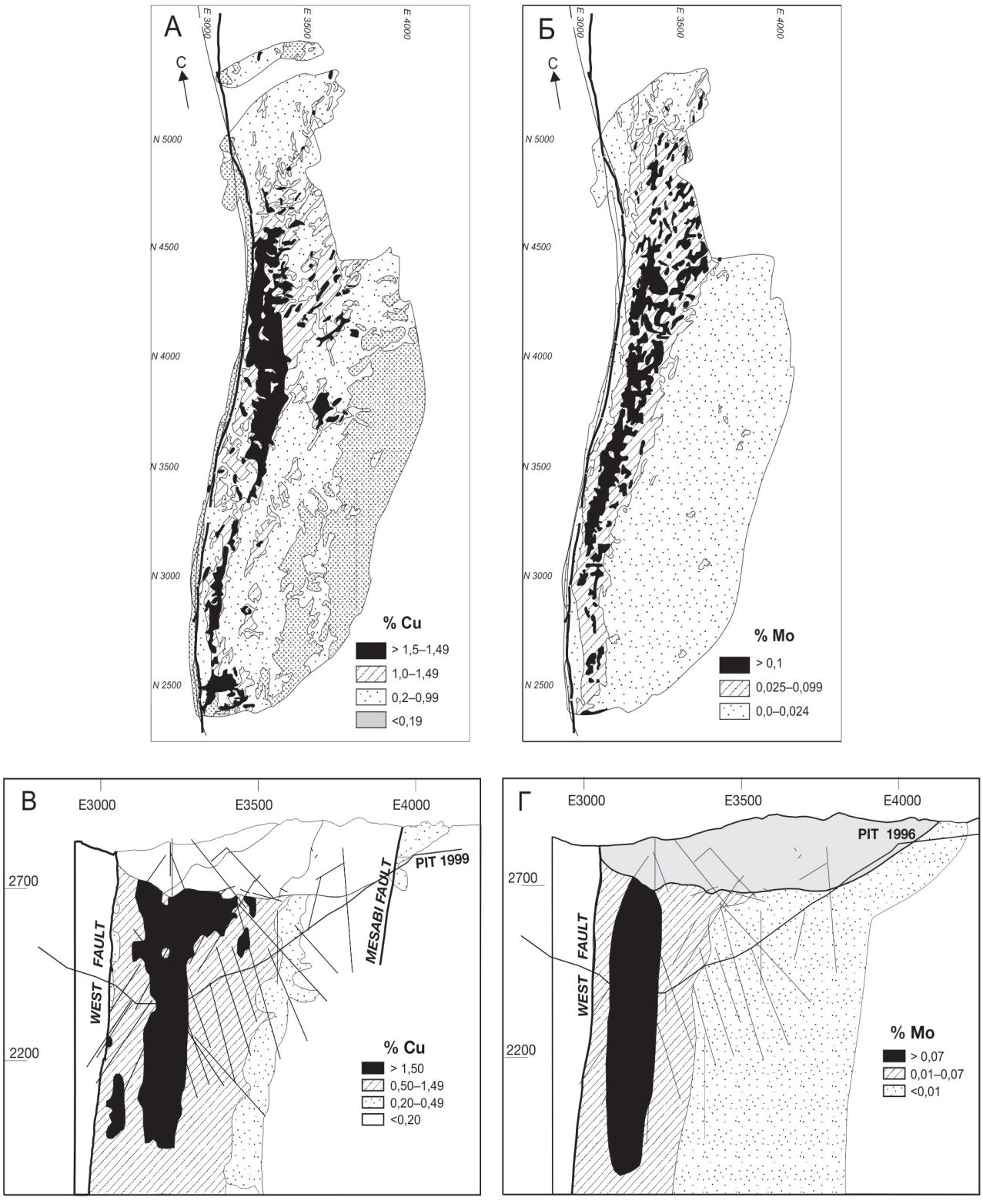


Рис. 9. Планы (А, Б) и поперечные разрезы (В, Г) рудного тела Cu-Mo-порфирового месторождения Чукикамата с распределением Cu и Mo [26]

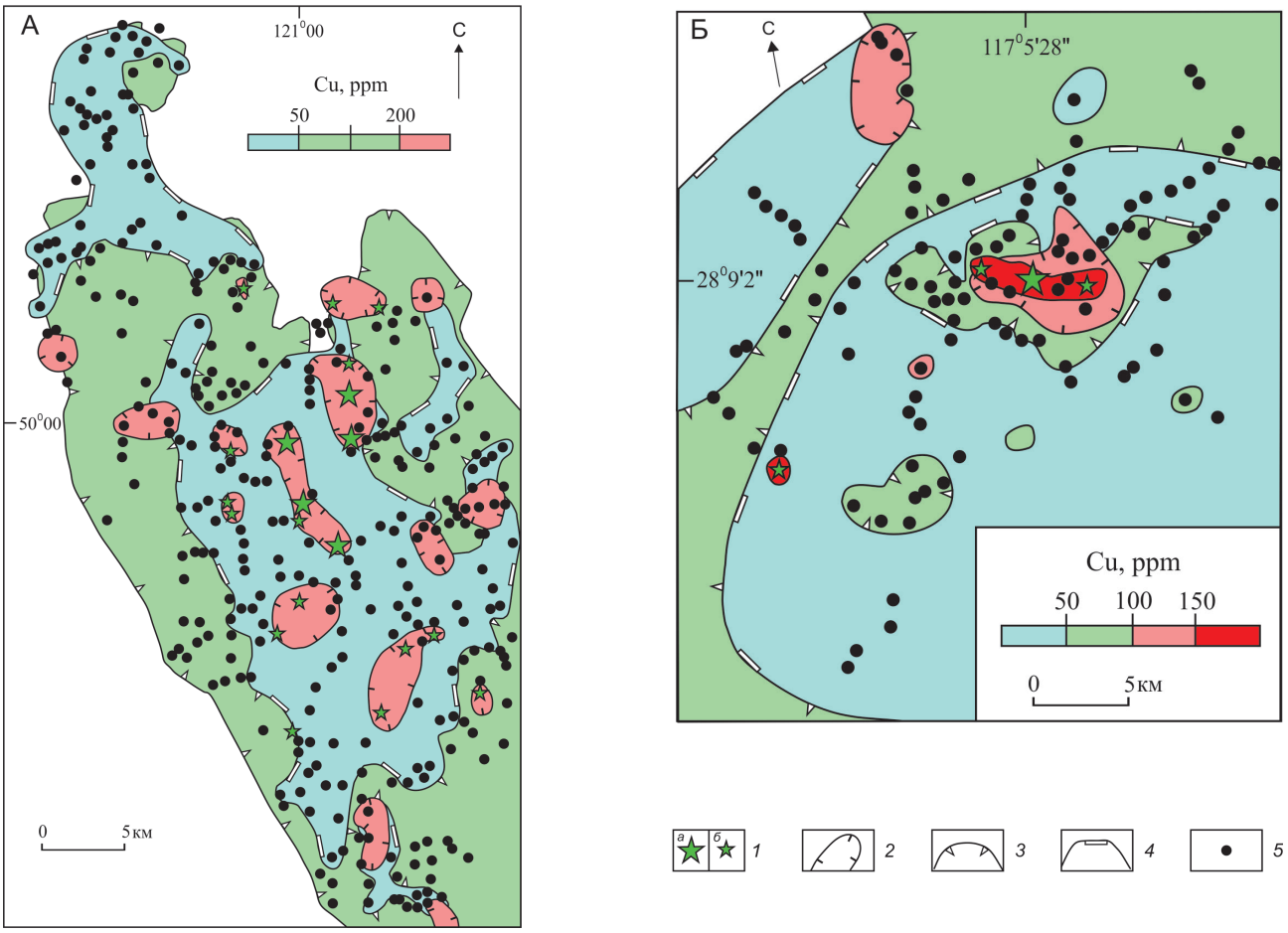


Рис. 10. Полярные геохимические системы рудных районов Хайлэнд Вэлли, Канада (А) и Дексинг, КНР (Б) [3]:

А – 16 медно-порфировых месторождений: Бетлехем, Вэлли Копер, Лорнекс, Хаймонт и др. в пределах крупного (около 1300 км^2) нижнеюрского гранитоидного батолита Гичон Крик; Б – медно-порфировые месторождения Тонгчанг, Фоджайу, Зушахаунг и Уангшан, сопряжённые со штоками гранодиорит-порфиров мезозойского возраста; вмещающие породы: верхнепротерозойские слабо метаморфизованные туфовые пеллиты, известняки и андезиты, туфы и известняки венда и кембрия, юрские конгломератами и андезиты; *1* – медно-порфировые месторождения: *а* – крупные и *б* – рядовые; *2–4* – зоны конвективно- рециклинговых гидротермальных рудообразующих систем: *2* – разгрузки рудоносных растворов (положительные аномалии Cu), *3* – застоя (с фоновым содержанием Cu), *4* – рудосбора, то есть выщелачивания (с содержанием Cu ниже фонового); *5* – точки отбора литохимических проб

На уникальном по запасам Cu-Mo-порфировом месторождении Эль Теньенте (Cu –109 млн. т (0,92%), Mo – 2,24 млн. т (0,02%)) рудная минерализация сопряжена с продуктивным натровым магматическим комплексом. Он включает в себя фанеритовые кварцевые диориты (тоналиты) и несколько порфировых фаз (главной рудоносной являются дацитовые порфириты формации Теньенте), а также возникшие при их становлении брекчиевые тела пяти типов с различным составом цемента – «магматическим», калиево-полевошпатовым, биотитовым, ангидритовым и турмалиновым [38]. Около половины запасов руд сосредоточены в турмалиновых брекчиях «Краевого пояса», слагающих кольцо в плане дневной поверхности, а на глубоких горизонтах – в штоке дацитовых порфиритов. Центральное безрудное «ядро» месторождения занимает пострудная брекчиевая трубка Браден. Форма рудного тела, охватывающего помимо рудоносных брекчий и дацитовых порфиритов вмещающие изменённые кварцевые диориты и породы мафического (габбро-диабаз-базальтового) комплекса Теньенте, подобна трубе – полому цилиндру с субвертикальными стенками. Её внутренний диаметр по поверхности около 800 м при ширине кольца от 400 до 700 м; на глубину оруденение прослежено до 2000 м. Многофазность продуктивного

магматизма отразилась в многочисленных рудообразующих минеральных ассоциациях; выделены 14 генераций прожилков, из которых 11 рудоносны [22].

Таким образом, петрофизические характеристики вмещающей среды наряду с другими факторами влияли на морфологию порфировых интрузивов и сопряжённых с ними рудоносных штокверков, уровни концентрации металлов в рудах и запасы месторождений. Уникальные (гигантские и супергигантские) по запасам объекты, сформировавшиеся в «подэкранных» структурно-петрофизических обстановках, как правило, выделяются сравнительно высокими содержаниями меди (на Чукикамате, Эль Теньенте, Бингхеме, Рио Бланко–Лос Бронсес, Ла Эскондиде, Грасберге и др. около 1,0% и выше), что, по-видимому, является следствием совмещения в пространстве продуктов многостадийного рудогенеза.

В отсутствие «экранирующих» толщ, но при наличии других благоприятных условий, формировались крупнообъёмные медно-порфировые штокверки с низкими содержаниями металлов. К их числу относится ряд средних и крупных (но не гигантских) месторождений с запасами меди до 5–6 млн. т, таких как Малмыжское в России, Актогайское и Айдарлинское в Казахстане. Перечисленные объекты локализованы в многофазных интрузивах, рамой которых являются вулканогенно-осадочные либо терригенные породы с благоприятными для хрупких деформаций свойствами. Как следствие, значительные размеры штокверковых систем (Малмыжское – 1,1×1,8 км, Актогай – 2,0×2,4 км и Айдарлы – 1,2×1,9 км по дневной поверхности) при средних содержаниях Cu менее 0,4%. К подобным объектам с низкими содержаниями меди в рудах и небольшими прогнозными ресурсами можно отнести также многочисленные Au-Mo-Cu-порфировые проявления «порфировых» РМС ВПП Северо-Востока России, сформированных на сочленении выступов фундамента поясов с вулканотектоническими депрессиями (Лагерное, Туманное, Ольховское, Ракетное, Моренное и др.) либо представляющих собой системы типа «интрузив под вулканом» (Кумроч, Китхой, Тымлат и др.).

Кроме проанализированных факторов, на масштабы формирующихся объектов могли влиять и иные, в частности, ***геохимические барьеры.***

При внедрении магматических тел присутствие реакционно-способных карбонатных пород (известняков, доломитов, мергелей) приводило к формированию проксимальных золотоносных Au-Cu- и дистальных Pb-Zn-скарновых залежей. Они встречаются на многих медно-порфировых месторождениях (Алмалык, Бингхэм, Грасберг, Ок Теди, Кэдья Хилл и др.) в экзоконтактовых зонах рудоносных интрузивов и отличаются повышенными концентрациями металлов, включая золото. В России к подобным объектам принадлежат месторождения Быстринское (Cu – 2,3 млн. т (0,72%), Au – 291 т (0,92 г/т)) и Култуминское (Au – 125 т (0,79 г/т)) в Забайкальском крае. В государственном балансе запасов полезных ископаемых Российской Федерации они отнесены к скарновому геолого-промышленному типу, но, судя по геологическому строению, принадлежат «порфировым» РМС.

Богатые железом базитовые комплексы интрузивной рамы также приводили к образованию руд с высокими (для медно-порфирового типа) содержаниями, поскольку способствовали осаждению меди из окисленных гидротермальных растворов. Как минимум половина запасов ряда сверхкрупных месторождений сосредоточена в таких породах: габбро-диабаз-базальтовом комплексе на Эль Теньенте (Чили), силлах протерозойских диабазов на Резольюшион и Рэе (США), толеитовых базальтах на Оюу Толгое (Монголия) [34].

Вместе с тем наличие реакционно-способных толщ в отсутствие благоприятных структурно-петрофизических условий могло привести к возникновению крупнообъёмных объектов с небогатыми рудами, таких как Актогай (ср. содержание Cu – 0,39%) в Казахстане, основные запасы которого сосредоточены в провисе кровли гранитоидного интрузива, сложенного изменёнными андезито-базальтами, андезитами и их туфами.

Рудоносность субстрата ВПП влияла на вещественный состав руд и в определённой мере на запасы формировавшихся медно-порфировых месторождений.

Древние геохимические ореолы могли являться одним из источников рудного вещества, о чём свидетельствуют часто наблюдаемые обширные отрицательные (с содержаниями ниже фоновых) аномалии меди и др. металлов на флангах РМС, которые рассматриваются [3, 10–12] как области рудосбора (выщелачивания металлов). Примеры – эквивалентные таким системам рудные районы Хайлэнд Вэлли (рис. 10, А) в Канаде, Дексинг (см. рис. 10, Б) и Дуобоашан в КНР, Актогайское (рис. 11) и Бощекульское рудные поля в Казахстане. Рудные месторождения субстрата ВПП, подвергавшиеся регенерации в тепловом поле интрузивов, также могли быть источником металлов. В частности, жильно-прожилковая Au-Ag-полиметаллическая минерализация фланговых зон Алмалыкского месторождения, судя по ситуации, является продуктом переотложения вещества стратиформных Pb-Zn-колчеданных залежей миссисипского типа, присутствующих во вмещающей известняково-доломитовой толще. В непосредственной близости к северу от Алмалыка находится частично регенерированное месторождение этого типа Кургашинкан.

Возможность заимствования металлов из вмещающих пород с их последующим переотложением разогретыми в тепловом поле порфировых интрузивов водами немагматического происхождения (метеорными, морскими) рассматривалась ещё с 1970-х годов. О роли таких вод в рудогенезе, кроме отмеченных выше особенностей строения геохимических полей, свидетельствуют многочисленные данные по изотопному составу кислорода разновозрастных генераций жильного

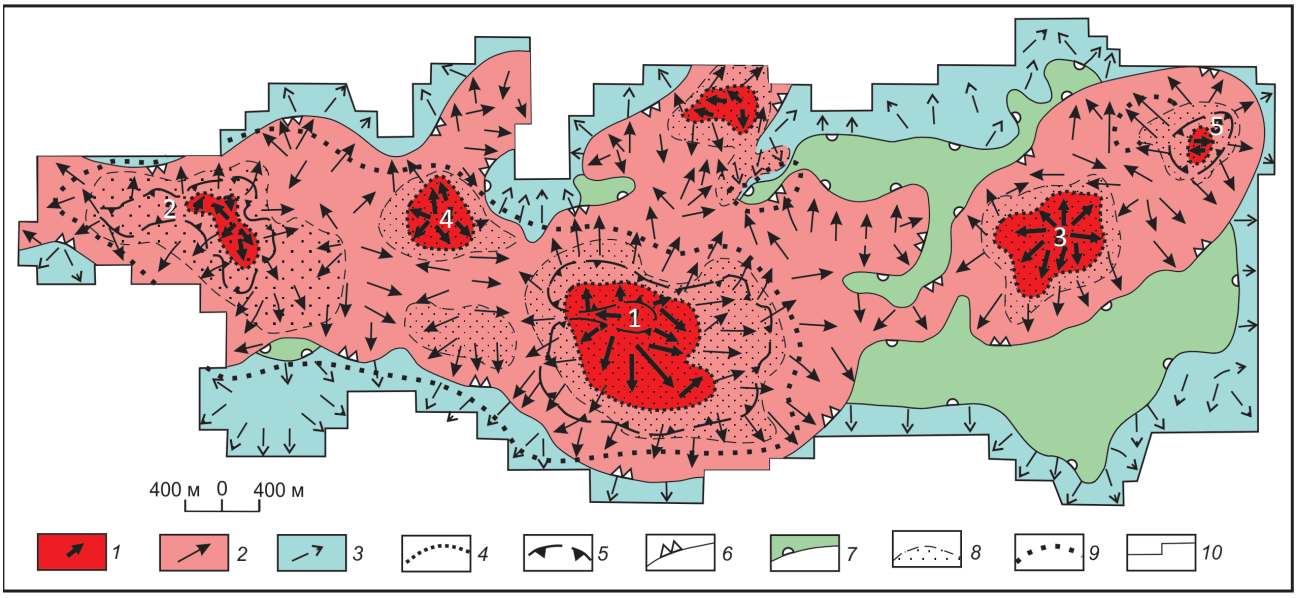


Рис. 11. Актогайское рудное поле, Казахстан. Схема концентрационных потоков в плане поверхности [12]:

1–3 – области и вектора изменения концентраций меди: *1* – роста и *2* – убывания в зонах рудной разгрузки, *3* – убывания в зонах поглощения (рудосбора); *4* – линии инверсии (с роста на убывание) концентрационных потоков; *5* – контуры промышленных меднорудных тел; *6* – границы зон рудной разгрузки; *7* – зоны застоя (с фоновым содержанием Cu); *8* – метасоматические изменения во внутренних частях медно-порфировых систем; *9* – контуры пиритовых ореолов; *10* – контур площади геохимической съёмки по первичным ореолам рассеяния меди; Cu-Mo-порфировые месторождения: Актогай (1), Айдарлы (2), Кзылкия (3) и рудопроявления участков: Промежуточный (4) и Восточный (5)

кварца медно-порфировых штокверков. Оценённая по ним доля амагматичных вод в общем объёме циркулирующих гидротермальных растворов к поздним стадиям деятельности рудообразующих систем, на которых образуются низкотемпературные фации метасоматитов филлизитовой, аргиллизитовой и пропилитовой метасоматических зон, а также развитые в периферийных фланговых и верхних частях систем зоны жильно-прожилковой кварц-полисульфидной минерализации и пиритовые ореолы, возрастает до 70–90% [15 и др.].

Имеются также данные по изотопии серы и свинца, свидетельствующие об участии немагматических вод и вещества интрузивной рамы в рудообразовании, в том числе по крупным и сверхкрупным объектам, в частности, супергигантскому месторождению Рио-Бланко–Лос-Бронсес в Чили [37]. Оруденелая брекчиевая трубка Сур-Сур на этом объекте, вмещающая наиболее богатые руды, образовалась в результате объёмного взрыва и брекчирования батолита Сан Франциско при его охлаждении, кристаллизации и дегазации в «подэкранной» структурно-петрофизической обстановке, о чём упоминалось выше. Брекчии сцементированы ранним биотитом и ангидритом на глубине, на более высоких (приблизительно с 3000 м) гипсометрических уровнях – турмалином и спекуляритом (зона кварц-серицит-турмалиновых изменений). Названные минералы частично, а на некоторых участках полностью замещены более поздними халькопиритом, магнетитом, пиритом и кварцем. Отмечается вертикальная зональность развития преобладающих железо-окисных минералов: магнетит – ниже уровня 3300 м, магнетит + спекулярит – 3300–3600 м, спекулярит – выше 3600 м. Выше уровня 4000 м среди сульфидов доминирует пирит.

Температуры гомогенизации газово-жидких включений в кварцевом и турмалиновом цементах брекчий – от 300° до 450°С, концентрация солей – от 0 до 69 вес.% NaCl эквивалента. Изотопный состав серы в сульфидном цементе варьирует в интервале значений $\delta^{34}S$ от – 4,1 до +2,7‰. Самые низкие значения $\delta^{34}S_{(sulfide)}$ – в образцах, отобранных с горизонтов между 3700 и 4000 м (верхи системы), где отмечаются наиболее высокие содержания меди в турмалиновой брекчии. Эта зона высокосортных руд также богата спекуляритом, местами замещённым магнетитом. Моделирование равновесия «сульфат–сульфид» указывает на то, что для возникновения наблюдаемой вертикальной изотопной (по сере) зональности сульфидов трубки Сур-Сур необходимо охлаждение приблизительно на 150°С на каждые 100 м глубины, что невозможно только при кондуктивном теплообмене и, соответственно, предполагает конвекцию тепла, а значит и гидротермальных растворов с вовле-

чением сравнительно холодных метеорных вод.

Отношения изотопов $^{206}Pb/^{204}Pb$ в ангидритовом цементе турмалиновой брекчии Сур-Сур и магматической брекчии Рио-Бланко находятся в диапазоне от 17,558 до 18,479, изотопов $^{207}Pb/^{204}Pb$ – от 15,534 до 15,623, а изотопов $^{208}Pb/^{204}Pb$ – от 37,341 до 38,412. Свинец в ангидрите существенно менее радиогенный, чем свинец из сульфидных руд и вмещающих магматических пород месторождения Рио-Бланко–Лос-Бронсес, что свидетельствует о его заимствовании из пород фундамента ВПП.

Приведённые термобарогеохимические и изотопно-геохимические данные в сочетании с минералогическим изучением руд и U-Pb датированием (SHRIMP по циркону пред-, син- и позднеминерализованных вулканических и интрузивных пород), $^{40}Ar/^{39}Ar$ (по биотиту, мусковиту, ортоклазу метасоматитов) и Re-Os (по молибдениту) [30] позволили расшифровать стадийность рудоообразования на рассматриваемом гигантском месторождении и объяснить повышенные содержания меди на верхних уровнях брекчиевой трубки Сур-Сур. Предполагается, что ангидрит, спекулярит и турмалин цемента рудоносных брекчий были отложены низкоконцентрированным окисленным гибридным раствором, который возник при конденсации флюидной фазы (H_2O, SO_2, HCl и B_2O_3), отделившейся от кристаллизующегося плутона и поднявшейся по каркасу взрывных трещин, в зоне присутствия амагматичных вод. Последующее отложение высокосортных сульфидных руд связывается с разгрузкой медьсодержащих высококонцентрированных магматических рассолов, «заполнивших» брекчиевую трубку, при их реакционном взаимодействии с кислыми по составу метеорными водами.

Роль многократного переотложения рудного вещества с его интегральным накоплением на верхних уровнях РМС показана в расчётной конвективно-рециклинговой модели массопереноса А.И.Кривцовым с соавторами [10, 11, 15], а также имитационным математическим моделированием перераспределения элементов в гидротермальных системах В.Л.Лосем [14]. В названных моделях количественными методами обосновывается участие метеорных (в некоторых случаях морских) вод в рудообразовании и, по крайней мере, частичное заимствование рудного вещества из пород, вмещающих порфировые интрузивы, при формировании медно-порфировых месторождений.

В отличие от ортомагматической модели, «смешанно-флюидная» конвективная модель рудогенеза «снимает» проблему дефицита масс рудного вещества и транспортирующих агентов (флюидов, растворов) для случаев, когда медно-порфировые месторождения сопряжены с небольшими по объёму магматическими телами, а крупных («материнских») интрузивных массивов под ними не зафиксировано. Исходя из допустимых значений первичного содержания воды в магме (до 4 вес.%) и растворимости Cu (в среднем 5 г/т в современных геотермальных системах) [15], невозможно предположить, что небольшие порфировые интрузивы могли продуцировать необходимые объёмы вод и рудного вещества для накопления установленных запасов таких месторождений, что свидетельствует в пользу концепции многооборотной гидротермальной конвекции, сопровождаемой экстракцией металлов из вмещающих пород в зонах «поглощения» (рудосбора) с их последующим переотложением в зонах рудной разгрузки. Эти представления не противоречат расчётным теплофизическим моделям становления магматических тел и возникающих гидротермальных потоков [8, 17, 18, 25, 31], а также гидродинамическим моделям современных природных высокотемпературных гидротермальных резервуаров, детально изученных как источники энергии [1, 9, 20] и представляющих собой ближайшие естественные аналоги верхних частей анализируемых систем. Вместе с тем, роль процессов выщелачивания и последующего переотложения металлов, в том числе с регенерацией более древних рудных месторождений различной формационной принадлежности, в образовании крупных и сверхкрупных медно-порфировых объектов до сих пор должным образом не оценена. Имеющиеся модельные расчёты баланса вещества в его предполагаемых источниках (рудоносных вмещающих породах, то есть геохимических ореолах), переносящих гидротермальных растворах и рудных телах (зонах рудной разгрузки) базируются на исходных параметрах (значениях объёмов рудоносных порфировых интрузивов, минерализованных зон и рудных тел, запасов и среднего содержания меди и др.) рядовых месторождений.

Выводы. Проанализированными обстановками не исчерпывается многообразие условий формирования медно-порфировых месторождений. Возможны многочисленные переходные варианты РМС с «промежуточными» элементами строения. Для образования крупных и сверхкрупных объектов необходимо сочетание нескольких описанных выше благоприятных факторов. К числу главных из них следует отнести геотектонические режимы регионального коллизионного сжатия, «подавляющие» вулканизм на ранних этапах развития ВПП и способствующие возникновению крупных, неглубоко залегающих, флюидонасыщенных магматических очагов. При этом наиболее перспективными для поисков крупных месторождений являются области пересечения глубинных трансформных разломов с листрическими, где при взбросо-сдвиговых деформациях в период разрядки тектонических напряжений возникают глубоко проникающие «каналы», по которым магма и отделяющиеся от неё летучие поднимаются в верхние зоны земной коры. В России к сегментам вулкано-плутонических поясов, сформировавшимся в подобных условиях, относится ряд магматогенных поднятий, в пределах которых расположены РМС порфирового типа с известными медно-порфировыми месторождениями, в том числе крупными, либо имеются перспективы для их поисков: Алучинское поднятие с Баимской (Пес-

чанка) и Иннахской системами в Курьинском ВПП, Болоньское с Малмыжско-Болоньской (Малмыжское) – в Западно-Сихотэ-Алиньском, Гонжинское с Арбинской, Пионерной и Октябрьское с Елна-Адамихинской – в Умлекано-Огоджинском и др.

Не менее важным фактором является петрофизическая гетерогенность структурно-вещественных комплексов субстрата ВПП. При орогенных деформациях она приводит к появлению локальных «структурных ловушек», способствовавших возникновению флюидных плюмов и рудоконцентрации. В отсутствии благоприятных структурно-петрофизических условий мощный флюидный поток, возникающий при декомпрессии и дефлюидизации остывающих и кристаллизующихся «материнских» плутонов (промежуточных магматических очагов) и их апофиз – порфировых интрузивов, может привести к возникновению обширных геохимических ореолов без промышленных содержаний металлов.

Определённую роль в формировании крупных объектов со сравнительно богатыми рудами могут играть геохимические барьеры и исходная рудоносность интрузивной рамы – надфоновые содержания металлов во вмещающих породах и древние рудные месторождения субстрата ВПП. При гидротермальной циркуляции растворов в тепловом поле интрузивов экстрагируемое из них рудное вещество выносится с нижних уровней систем на верхние с переотложением и интегральным накоплением.

В качестве одного из признаков, позволяющих отнести изучаемые медно-порфировые объекты к классу крупных уже на стадии поисковых работ, можно рассматривать площади рудоносных порфировых интрузивов (или брекчиевых трубок) на дневной поверхности, которые в определённой мере отражают параметры продуцирующих их магматических очагов. Как показал анализ выборки из 68 медно-порфировых месторождений мира [13], с большими по размерам (площадью от 1 км^2) интрузивами ассоциируют более крупные месторождения. Исключения – сравнительно незначительные площади порфировых штоков на таких крупных объектах, как Актогай, Айдарлы, Коунрад (Казахстан), Сар Чешме (Иран), Токепала (Перу) и других – объясняются тем, что эрозией вскрыты лишь верхние части (апофизы) магматических тел, которые на глубине имеют более значительные размеры. Параметры не вскрытых эрозией рудоносных интрузивов и ниже залегающих магматических очагов могут прогнозироваться с помощью объёмного моделирования по данным глубинного сейсмического зондирования, магнито- и гравиразведки.

Значительные размеры рудоносных интрузивов, с которыми сопряжены крупные объекты, соответственным образом отражаются в параметрах связанных с их становлением гидротермальных систем. Об их масштабах можно судить по площадям: первичных и вторичных геохимических ореолов Cu, Mo, Pb, Zn и пиритовых ореолов (n–n×10 км^2); электроразведочных и магнитометрических аномалий (n×10 км^2); зон рудовмещающих метасоматитов (n×10 км^2), а также вертикальному размаху оруденения, достигающему на месторождениях-гигантах сотни метров–первые километры.

Положительными критериями для выделения территорий, перспективных для обнаружения скрытых, в том числе крупных, медно-порфировых месторождений, являются также реликты (ксенолиты) слабопроницаемых толщ, перекрывающих гранитоиды рудоносных плутоногенных формаций. Прямые поисковые признаки месторождений, локализованных под такими толщами, из-за «спрессованности» рудно-метасоматических колонок и «угнетённого» развития надрудных геохимических ореолов на дневной поверхности могут быть проявлены слабо или вообще отсутствовать. Для их поисков наряду с традиционными геолого-структурными, геофизическими и геохимическими методами целесообразно применять современные геохимические методы изучения наложенных солевых ореолов, такие как EnzymeLeachSM, BioLeach (Канада), успешно применяющиеся для обнаружения скрытых медно-порфировых месторождений на больших глубинах [16].

К критериям прогноза крупных медно-порфировых объектов следует также отнести наличие нескольких порфировых фаз (штоков, даек, брекчиевых трубок), каждая из которых сопровождается «своей» минерализацией, хотя основная масса руды обычно «связана» с одной-двумя из них. Практически все гигантские и супергигантские месторождения сопряжены с многофазными интрузивами, строение которых отражает цикличность проявления продуктивного плутонизма (многократное поступление расплава из магматического очага). Для таких месторождений характерна многостадийность рудообразования, выражающаяся в наличии многочисленных разновозрастных минеральных ассоциаций руд. На мелких объектах обычно выделяются одна-две порфировые фазы и ограниченное число минеральных ассоциаций, причем наиболее поздние с полиметаллами слабо проявлены либо отсутствуют вовсе [15].

Важным вопросом при поисках месторождений, включая медно-порфировые, в том числе крупные, является степень их сохранности от эрозии. В условиях активных континентальных окраин и островных дуг, при резком воздымании тектонических блоков земной коры, месторождение может быть полностью уничтожено в короткий (в геологическом смысле) промежуток времени – десятки–сотни тысяч лет. Этим объясняется мезозой-кайнозойский возраст большинства медно-порфировых месторождений мира; менее многочисленны палеозойские и известны лишь единичные докембрийские объекты (Аитик в Швеции). Наилучшим вариантом является «консервация» месторождения перекрывающими отложениями, с последующей

умеренной эрозией, вскрывающей верхнерудные либо надрудные части медно-порфировых систем. К подобным объектам, в частности, А.Уайнрайтом с соавторами [26] на основании изучения абсолютных возрастов рудовмещающих, пострудных и перекрывающих пород (по U-Pb датированию цирконов) отнесено гигантское Au-Mo-Cu-порфировое месторождение Оюу Толгой в Монголии.

Приведённые в статье материалы могут быть использованы для совершенствования геолого-генетических моделей РМС порфирового типа и построенных с их учётом прогнозно-поисковых моделей медно-порфировых рудных полей и месторождений, являющихся основой для проведения поисковых работ.

Автор выражает благодарность Т.А.Чуриловой и Т.А.Пивоваровой, оказавшим помощь в оформлении иллюстраций.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Геотермические* и геохимические исследования высокотемпературных гидротерм. – М.: Наука, 1986.
2. *Голованов И.М.*, *Николаева Е.И.*, *Кажихин М.А.* Комплексная прогнозно-поисковая модель медно-порфировой формации. – Ташкент: ФАН, 1988.
3. *Гольдберг И.С.*, *Абрамсон Г.Я.*, *Лось В.Л.* Источники меди в медно-порфировых месторождениях на основе картирования полярных геохимических систем // Геология и охрана недр. 2014. № 4. С. 14–26.
4. *Звездов В.С.* Крупные и сверхкрупные месторождения медно-порфирового семейства в ранговых рядах запасов и содержаний // Отечественная геология. 2005. № 2. С. 46–56.
5. *Звездов В.С.*, *Мигачев И.Ф.*, *Минина О.В.* Морфологические типы меднопорфировых штокверков и обстановки их формирования // Руды и металлы. 2018. № 4. С. 37–52.
6. *Звездов В.С., Мигачев И.Ф., Минина О.В.* Прогнозно-поисковые модели комплексных рудно-магматических систем вулкано-плутонических поясов Востока России // Отечественная геология. 2011. № 3. С. 13–21.
7. *Звездов В.С.*, *Минина О.В.* Рудно-магматические системы вулкано-плутонических поясов Востока России // Руды и металлы. 2010. № 1. С. 48–59.
8. *Звездов В.С.*, *Тихонов В.С.* Тепломассоперенос в медно-порфировых рудообразующих системах по данным математического моделирования // Руды и металлы. 1995. № 6. С. 52–57.
9. *Кирюхин А.В.*, *Делемень И.Ф.*, *Гусев Д.Н.* Высокотемпературные гидротермальные резервуары. – М.: Наука, 1991.
10. *Количественные* характеристики рудообразующих меднопорфировых систем / А.И.Кривцов, В.С.Звездов, М.М.Гирфанов, И.В.Егорова // Отечественная геология. 1995. № 1. С. 17–28.
11. *Кривцов А.И.* Распределение масс и содержаний металлов в гидротермальных рудообразующих системах // Отечественная геология. 1996. № 8. С. 13–20.
12. *Крупные* и суперкрупные месторождения рудных полезных ископаемых. В 3-х томах / Под ред. Д.В.Рундквиста, Н.П.Лаверова, Ю.Г.Сафонова. – М.: ИГЕМ, 2006.
13. *Крупные* медно-порфировые рудно-магматические системы и их геотектоническая позиция / О.В.Минина, В.С.Звездов, И.Ф.Мигачев, М.М.Гирфанов // Обзор ВИЭМС. – М., 1991.
14. *Лось В.Л.* На пути к количественной металлогении // Отечественная геология. 2012. № 1. С. 3–11.
15. *Медно-порфировые* месторождения. Сер. модели месторождений цветных и благородных металлов / А.И.Кривцов, В.С.Звездов, И.Ф.Мигачев, О.В.Минина. – М.: ЦНИГРИ, 2001.
16. *Овсянникова Т.М.* Геохимические методы поисков скрытых месторождений // Разведка и охрана недр. 2017. № 8. С. 13–19.
17. *Савилкин С.Б.* Фильтрационная термоконвекция растворов и поиски гидротермальных месторождений // Автореф. дис. … канд. физ.-мат. наук. – М.: МГГА, 1997
18. *Cathles L.M.* Analyses of cooling of intrusives by ground water convection, which includes boiling // Econ. Geol. 1977. Vol. 12. P. 804–826.
19. *Cook D.R.*, *Hollings P.*, *Walshe J.L.* Giant Porphyry Deposits: Characteristics, Distribution, and Tectonic Controls // Econ. Geol. 2005. Vol. 100. P. 801–818.
20. *Donaldson I.G.*, *Grant M.A.* Heat extraction from geothermal reservoirs // Geothermal systems: Principles and case histories. – NY: Pergamon Press, 1981. P. 145–179.
21. *Wainwright A.J., Tosdal R.M., Lewis P.D., Friedman R.M.* Exhumation and Preservation of Porphyry Cu-Au Deposits at Oyu Tolgoi, South Gobi Region, Mongolia // Econ. Geol. 2017. Vol. 112. P. 591–601.
22. *Geology*, Mineralization, Alteration, and Structural Evolution of The El Teniente Porphyry Cu-Mo Deposit / J.Cannell, D.R.Cooke, J.L.Walshe, H.Stein // Econ. Geol. 2005. Vol. 100. P. 979–1003.
23. *Gow P.A.*, *Walshe J.L.* The Role of Preexisting Geologic Architecture in the Formation of Giant Porphyry-Related Cu±Au Deposits: Examples from New Guinea and Chile // Econ. Geol. 2005. Vol. 100. P. 819–833.
24. *Gruen G.*, *Heinrich C.A.*, *Schroeder K.* The Bingham Canyon Porphyry Cu-Mo-Au Deposit. II. Vein Geometry and Ore Shell Formation by Pressure-Driven Rock Extension // Econ. Geol. 2010. Vol. 105. P. 69–90.
25. *Henley R.W.*, *McNabb A.* Magmatic vapor plums and ground-water interaction in porphyry copper emplacement // Econ. Geol. 1978. Vol. 73. № 1. P. 1–20.
26. *Geology* of the Chuquicamata mine: A progress report / G.Ossandón, R.Fréraut, L.B.Gustafson, D.D.Lindsay, M.Zentilli // Econ. Geol. Vol. 96. № 2. P. 249–270.
27. *İmer A.*, *Richards J.P.*, *Muehlenbachs K.* Hydrothermal Evolution of the Çöpler Porphyry-Epithermal Au Deposit, Erzincan Province, Central Eastern Turkey // Econ. Geol. 2016. Vol. 111. P. 1619–1658.

28. *Kay S.M.*, *Mpodozis C.*, *Coira B.* Neogene magmatism, tectonism and mineral deposits of the central Andes: Society of Economic Geologists Special Publication. 1999. 7. P. 27–59.
29. *Laznicka P.* Quantitative relationships among giant deposits of metals // Econ. Geol. 1999. Vol. 94. P. 453–473.
30. *Magmatic* and Hydrothermal Chronology of the Giant Río Blanco Porphyry Copper Deposit, Central Chile: Implications of an Integrated U-Pb and $^{40}Ar/^{39}Ar$ Database / K.Deckart, A.H.Clark, A.A.Celso et al. // Econ. Geol. 2005. Vol. 100. P. 905–934.
31. *Norton D.L.* Fluid and heat transport phenomena typical of copper-bearing pluton environments // Advances in geology of porphyry copper deposits. Southwestern North America. – Tucson: The University of Arizona Press, 1983. P. 59–72.
32. *Richards J.P.* A shake-up in the porphyry world? // Econ. Geol. 2019. Vol. 113. P. 1225–1233.
33. *Richards J.P.* Tectono-magmatic precursors for porphyry Cu-(Mo-Au) deposit formation // Econ. Geol. 2003. Vol. 98. P. 1515–1533.
34. *Sillitoe R.H.* Porphyry Copper Systems // Econ. Geol. 2010. Vol. 105. P. 3–41.
35. *Singer D.A.*, *Berger V.I.*, *Moring B.C.* Porphyry copper deposits of the world: database and tonnage models // U.S. Geological Survey Open-File Report 2008-1155. Online version. 2008.
36. *Source* Plutons Driving Porphyry Copper Ore Formation: Combining Geomagnetic Data, Thermal Constraints, and Chemical Mass Balance to Quantify the Magma Chamber Beneath the Bingham Canyon Deposit / I.Steinberger, D.Hinks, T.Driesner, C.A.Heinrich // Econ. Geol. 2013. Vol. 108. P. 605–624.
37. *Sulfur* isotope and mineral zonation in the Sur-Sur breccia complex, Río Blanco copper-molybdenum deposit, Chile: Implications for ore genesis / P.H.Frikken, D.R.Cooke, J.L.Walshe et al. // Econ. Geol. 2005. Vol. 100. P. 935–961.
38. *Vry V.H.*, *Wilkinson J.J.*, *Millan J.S.J.* Multistage Intrusion, Brecciation, and Veining at El Teniente, Chile: Evolution of a Nested Porphyry System // Econ. Geol. 2010. Vol. 105. P. 119–153.

К СВЕДЕНИЮ АВТОРОВ

Плата с авторов за публикацию (в том числе с аспирантов) не взимается. Гонорар не выплачивается. Автор, подписывая статью и направляя ее в редакцию, тем самым предоставляет редакции право на ее опубликование в журнале и размещение в сети «Интернет».
Направление в редакцию работ, опубликованных ранее или намеченных к публикациям в других изданиях, не допускается.

По всем вопросам, связанными со статьями, следует обращаться в редакцию по тел. +7 (495)315-28-47, E-mail: ogeo@tsnigri.ru

Адрес редакции: 117545, г. Москва, Варшавское шоссе, д. 129, корп. 1