

## Структурно-петрофизические обстановки формирования медно-порфировых штокверков

Рассмотрены структурно-петрофизические обстановки формирования медно-порфировых месторождений. Проанализировано влияние деформационной природы вмещающих сред на морфологию порфировых интрузивов и брекчиевых трубок, форму и строение сопряжённых с ними штокверков, содержания металлов в рудах. Показано, что одним из ведущих факторов образования крупных и сверхкрупных месторождений является присутствие над рудоносными интрузивами малопроницаемых пород – карбонатных толщ, пластично деформирующихся при высоких температурах и давлении, либо лавовых фаций вулканогенных, интрузивных основного и среднего составов и метаморфических пород с высокими упруго-прочностными свойствами. Наличие подобных структурно-петрофизических «экранов» приводило к появлению флюидных плюмов и рудонакоплению в значительных масштабах. Доломиты, известняки и богатые железом базитовые комплексы в составе таких толщ являлись также геохимическими барьерами для гидротермальных растворов, способствовавшими отложению высокосортных руд.

*Ключевые слова:* медно-порфировые месторождения, морфология, рудные тела, рудно-магматические системы, петрофизические параметры, порфировые интрузивы, штокверки.

ЗВЕЗДОВ ВАДИМ СТАНИСЛАВОВИЧ, кандидат геолого-минералогических наук, заведующий отделом, metallogeny@yandex.ru

Федеральное государственное бюджетное учреждение «Центральный научно-исследовательский геолого-разведочный институт цветных и благородных металлов» (ФГБУ «ЦНИГРИ»), г. Москва

## Structural and petrophysical formation environments of porphyry copper stockworks

V. S. ZVEZDOV

Central Research Institute of Geological Prospecting for Base and Precious Metals (TsNIGRI), Moscow

Structural and petrophysical environments of porphyry copper deposit formation are discussed. The paper analyzes deformation host environment effect on porphyry intrusion and breccia pipe morphology, form and structure of associated stockworks and metal ore grades. It is shown that major and giant deposit formation primarily depends on poorly permeable rocks, carbonate sequences suffering plastic deformation at high temperatures and pressure, present above ore-bearing intrusive, or basic and intermediate volcanogenic and intrusive lava facies and highly resilient and strong metamorphic rocks. The presence of such structural and petrophysical “screens” resulted in fluid plume emergence and extensive ore accumulation. Dolomites, limestones and Fe-rich basite assemblages hosted by these sequences also acted as geochemical barriers for hydrothermal solutions facilitating high-grade ore deposition.

*Key words:* porphyry copper deposits, morphology, orebodies, ore magmatic systems, petrophysical parameters, porphyry intrusive, stockworks.

**Обстановки формирования медно-порфировых месторождений.** Главными факторами, влиявшими на запасы медно-порфировых месторождений (МПМ), являлись геодинамические режимы образования вмещающих их рудно-магматических систем (РМС), от которых зависели размеры и флюидонасыщенность магматических очагов («материнских» плютонов) – источников необходимого тепла и металло-

носных флюидов, а также структурно-петрофизические условия «вскрытия» и разгрузки таких очагов.

*Месторождения «мирового класса» (гигантские и супергигантские) формировались в специфических геодинамических обстановках* развития отдельных сегментов окраинно-континентальных и островодужных вулканоплутонических поясов (ВПП), на начальных стадиях образования которых в результате

«пологой» субдукции океанических хребтов и плато под континентальные окраины и островные дуги господствовал режим *коллизии сжатия*. Такой режим способствовал утолщению земной коры (ЗК), выплавлению известково-щелочных магм при её взаимодействии с астеносферой, насыщению магм летучими веществами за счёт субдуцирующих океанических плит, мантийного слэба и дегидратации металлоносных осадков, что приводило к появлению окисленных расплавов с повышенными содержаниями Cu, Au, Ag. Давление препятствовало их подъёму в верхние части ЗК, то есть «подавляло» вулканизм, приводя к возникновению крупных магматических камер (промежуточных очагов) на глубинах от 5 до 15 км, в которых скапливались значительные объёмы отделившихся от кристаллизующихся расплавов металлоносных флюидов. Латеральное сжатие «ограничивало» количество апофиз в кровле магматической колонны, обеспечивая сосредоточение флюидной фазы в апикальной зоне единого крупного плутона, а не в нескольких мелких [29, 40, 41].

Состояние «неустойчивого равновесия» подобных систем с небольшим, 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. В ядерной части плутонов по мере становления и дегазации фанеритовых фаз скапливался остаточный расплав, обогащённый летучими и металлами. На дневной поверхности магматические очаги проявлялись слабой вулканической и фумарольной активностью. Возможными триггерами, вызывавшими «вскрытие» магматических камер при орогенезе 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 взрывным вулканическим извержениям (с «распылением» рудного вещества) в случае взламывания вскрыши, так и к появлению рудогенерирующих медно-порфировых систем (МПС), если имелись препятствия к достижению флюидным потоком дневной поверхности [39]. Во втором случае при «прорыве» металлоносного остаточного расплава из ядерной части «материнского» плутона в верхние части ЗК возникали порфировые интрузивы, часто трубки взрывных брекчий, а также каркасы мелких

«взрывных» и контракционных трещин, по которым флюиды поднимались от источника – промежуточного магматического очага – к областям разгрузки (рудотложения). Медно-порфировые месторождения формировались сравнительно быстро, по разным оценкам, от  $\leq 100$  тыс. лет до первых сотен тыс. лет [7, 17, 39, 41, 44 и др.], на небольших глубинах (2–5 км).

Значительные по запасам месторождения сопряжены с многофазными интрузивами, строение которых отражает дискретное поступление расплава из длительно функционировавших магматических очагов. Для таких объектов характерны несколько порфировых фаз (штоков, даек, брекчиевых трубок), каждая из которых сопровождается «своей» минерализацией, хотя отложение основной массы руд обычно связано со становлением интрузивов одной, реже двух из них. Их морфология в основном и определяет форму рудных тел. Многостадийность рудотложения выражается в многочисленных рудообразующих минеральных ассоциациях, что нетипично для рядовых МПМ.

Крупные магматические очаги появлялись в областях сопряжения парных систем глубинных «внутридуговых» («бывших» синседиментационных литрических) разломов, параллельных зонам субдукции, и крутопадающих поперечных трансформных разломов. Такие участки в период третичной коллизии магматических дуг Тихоокеанского кольца «фокусировали» тектонические напряжения с аномально высоким давлением. Разрядка этих напряжений с вздыманием участков ЗК, взбросо-сдвиговыми деформациями и эрозией приводила к возникновению глубинных магмо- и (или) флюидовыводящих крутопадающих каналов («полостей») в местах пересечения разломов, перегибов, флексур), контролировавших размещение магматических очагов («материнских» плутонов), «питавших» гипабиссальные и субвулканические порфировые интрузивы (штоки, рои даек, брекчиевые трубки), с которыми ассоциируют МПМ [32, 41 и др.]. Именно в таких областях сосредоточено большинство из четырёх десятков известных крупнейших Cu-Mo-, Au-Mo-Cu- и Au-Cu-порфировых месторождений мира, среди которых: Чукикамата и Эль Теньенте с запасами Cu более 100 млн т каждое, Эль Абра, Рио Бланко–Лос Бронсес, Ла Эскондида, Лос Пеламбрес, Портреллинос, Эль Сальвадор в Чили; Бингхэм, Моренси-Меткалф, Пибл, Рэй, Санта Рита и др. в США; Ла Гранья, Куахоне в Перу, Ла Каридад в Мексике; Грасберг, Уафи-Голпу в Индонезии; Фрида Ривер, Ок Теди в Папуа – Новая Гвинея.

*Мелкие и средние по запасам Au-Mo-Cu- и Au-Cu-порфировые месторождения третичных островных дуг (ВПД) Тихоокеанского кольца, Тетиса, Карпато-Балканской и других минерагенических провинций*

сформировались в режиме слабого (до нейтрального) растяжения [29, 41]. Они локализованы во внутренних частях порфировых РМС со сравнительно небольшими магматическими очагами. В верхних периферийных зонах таких систем, в близповерхностной 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 металллоносных 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, Малетойвайская (Россия).

Специфическими геодинамическими обстановками, способствовавшими появлению мощных флюидонасыщенных магматических очагов, не исчерпываются условия, необходимые для рудоконцентрации в значительных масштабах. Не менее важны **структурно-петрофизические обстановки** их «вскрытия». В отсутствие «литолого-структурных ловушек» разгрузка восходящего из очага металллоносного флюидного потока могла привести к образованию обширных минерализованных ореолов с низкими содержаниями металлов (геохимических аномалий) либо мелких объектов [7, 29, 32]. Наиболее благоприятными для возникновения флюидных плюмов и рудонакопления были петрофизически неоднородные (гетерогенные) среды. Наличие малопроницаемых, пластично деформирующихся толщ либо «жестких» блоков над рудоносными интрузивами обуславливало анизотропию полей тектонических напряжений, отражалось в стилиях и интенсивности деформаций пород при их разрядке, приводило к появлению структур, в которых происходила разгрузка рудоносных растворов.

Анализ геолого-структурных условий локализации большинства МПМ «мирового класса» показал, что в их геологических разрезах в тех или иных масштабах присутствуют реликты перекрывающих толщ, в целом не склонных к хрупким деформациям – пластичных либо с высокими значениями порогов упругости и разрушения. По известным классификациям [4, 24], они могут быть отнесены соответственно к *упруго-пластичному* и *упруго-вязкому* типу сред структурообразования.

К *первому* из названных типов «компетентных» толщ в рудных районах с МПМ принадлежат карбонатные, терригенно-карбонатные, иногда флишидные отложения, широко развитые в фундаменте (субстрате) островодужных базальтоидных и неко-

торых периокеанических андезитоидных ВПП. При высоких температурах и давлении они подвержены пластичным деформациям. Ко *второму*, характерному для андезитоидных поясов с сиало-фемическим и сиалическим фундаментом можно отнести лавовые фации вулканитов среднего состава, габбродиориты и диориты ранних фанеритовых фаз рудоносных магматических комплексов, в редких случаях мафические (базальты, диабазы, габбро) и метаморфогенные (гранито-гнейсы, амфиболиты, кристаллические сланцы) комплексы субстрата поясов. Они обладают повышенными упруго-прочностными свойствами (порогами прочности), но растрескиваются при приложении достаточных нагрузок. При существенных различиях в деформационной природе толщ обоих типов обладают низкими фильтрационными свойствами. Они малопроницаемы для гидротермальных растворов, являясь для них своеобразными «структурно-петрофизическими экранами».

К **толщам с упруго-пластичной деформационной природой** принадлежат третичные известняки Новогвинейской (Дарай/Менди) формации, перекрывающие мезозойские обломочные породы формаций Йеру и Чим [32] и участвующие в строении субстрата кайнозойского Новогвинейского ВПП, с плутогенными формациями которого сопряжены Au-Cu-порфировые месторождения-гиганты Грасберг, Уафи-Голпу, Ок Теди и Фрида Ривер. Слагая верхние части геологического разреза, они в сочетании с режимом коллизионного сжатия способствовали возникновению магматических и флюидных плюмов, а затем при их вскрытии и разгрузке оказывали экранную роль, оказывая воздействие на восходящий флюидный поток, приводя к рудонакоплению в значительных масштабах. Естественно, что в такой обстановке существенная часть запасов меди и золота сосредоточена в скарновых залежах в экзоконтактах рудоносных порфировых интрузивов.

Признаки влияния «экранирующих» карбонатных и терригенно-карбонатных толщ на рудогенез отмечаются не только в поясах Юго-Восточной Азии, но и в ВПП Северной Америки, Европы и Азии – на Au-Mo-Cu-порфировых месторождениях – сверхкрупных, таких как Бингхэм, Санта Рита, Пибл, Резолюион и др. (США), Алмалык (Узбекистан) и рядовых объектах – Речк (Венгрия), Кызата, Сары-Чеку, Нижнекаульдинское (Узбекистан), Цаган-Субурга, Хармагтай (Монголия), Златно (Чехия), Майданпек (Сербия), Кёплер (Турция) и др. В верхних частях рудовмещающих разрезов этих месторождений присутствуют ксенолиты различных (до гигантских) размеров мраморизованных известняков, доломитов, мергелей, алевролитов-глинистых пород.

К *упруго-вязкому типу сред* относятся миоценовые андезитовые лавы формации Фареллонес, перекрывающие олигоценую толщу переслаивающихся песчаников, алевролитов и туфобрекчий формаций Абанико и Гойя Мачали фундамента андезитоидных ВПП с уникальными по запасам Cu-Mo-порфировыми месторождениями Эль Теньенте, Рио Бланко-Лос Бронсес, Лос Пеламбрес и др., в центральной части Чили. При коллизионном сжатии разрядка тектонических напряжений происходила в основном по подошве компетентной толщи с возникновением срывов надвигового типа, в то время как в более хрупких нижележащих туфогенно-осадочных отложениях происходило интенсивное складкообразование, возникали многочисленные трещины и разломы преимущественно сколового типа, по которым проникали рудоносные расплавы, поднимавшиеся до гипсометрических уровней андезитовой толщи формации Фареллонес [32]. В ряде случаев избыточное давление газов, отделявшихся от охлаждающихся и кристаллизующихся магматических тел, приводило к неоднократному прорыву флюидов сквозь эту толщу с взрывным растрескиванием окружающих пород и образованием эруптивных брекчий. Они встречаются на многих медно-порфировых месторождениях, в том числе перекрытых карбонатными отложениями, являясь следствием «вторичного вскипания» расплава (потери летучих) при кристаллизации, однако в рассматриваемой обстановке названные процессы приобретали катастрофические масштабы. В результате возникали многофазные, сложнопостроенные, крупные брекчиевые трубки, вмещающие значительные запасы руд как на вышеупомянутых Cu-Mo-порфировых объектах чилийского сегмента ВПП Андийской минерагенической провинции. В андезитоидных поясах с сиалическим и сиало-фемическим фундаментом «экранирующее» воздействие, способствующее концентрации металлов, могли оказать породы фундамента с высокими упруго-прочностными параметрами, такие как рифейско-раннекембрийские гнейсы, амфиболиты и кристаллические сланцы, в виде останцов присутствующие в провисах кровли рудоносного интрузива крупного Mo-Cu-порфирового месторождения Эрдэнтуйн-Обо (Монголия).

При громадных запасах практически все гигантские и супергигантские Cu-Mo-, Au-Mo-Cu- и Au-Cu-порфировые месторождения ВПП Тихоокеанского кольца (Эль Теньенте, Рио Бланко-Лос Бронсес, Ла Эскондида в Чили; Бингхэм, Пибл, Резолюцион и др. в США; Ла Гранья, Куахоне в Перу, Грасберг в Индонезии, Фрида Ривер, Ок Теди, Уафи-Голпу в Папуа – Новая Гвинея и др.) отличаются высокими (для МПМ) концентрациями металлов в рудах (среднее

содержание Cu обычно не менее 1,0 %), что является следствием наложения продуктов многостадийного рудогенеза из-за «экранирующего» воздействия пород вскрыши. Не исключено, что и самое крупное в мире Cu-Mo-порфировое месторождение Чукикамата (Чили) принадлежит к их числу, о чём свидетельствуют локализация рудного тела в апикальной части штока гранодиорит-порфиров Чуки, его пластообразная форма в продольном разрезе и клиноподобная в поперечном, совмещение в пространстве разновозрастных метасоматических и рудообразующих минеральных ассоциаций и, как следствие, высокие содержания Cu и Mo, отмеченные во многих публикациях [36, 43 и др.]. Для Au-Cu-порфировых объектов островодужных поясов Юго-Восточной Азии с фемическим фундаментом содержания Au в рудах иногда достигают аномально высоких (для МПМ) значений, причём существенная часть запасов золота часто сосредоточена в скарновых залежах, сформировавшихся в экзоконтактах рудоносных интрузивов, как на крупном месторождении Ок Теди (Cu – 5 млн т, среднее содержание 0,76 %, Au – 490 т, 1,1 г/т).

**Специализированные исследования медно-порфировых штокверков.** Вышеупомянутые факторы возникновения крупных и сверхкрупных МПМ проанализированы в недавних работах [7, 11]. В настоящей статье более детально рассмотрены структурно-петрофизические условия рудообразования. В её основу положены материалы специализированных исследований автора на ряде месторождений Узбекистана и Казахстана, значительная часть которых до настоящего времени не была опубликована.

**Главной целью исследований** являлась оценка влияния петрофизических характеристик рудовмещающих сред на морфологию, строение и параметры медно-порфировых штокверков, включая содержания металлов.

В качестве **объектов изучения** были выбраны Au-Mo-Cu-порфировые месторождения Алмалыкского (Кальмакыр, Дальнее, Северо-Западный Балыкты) и Саукбулакского (Кызата) рудных полей в Узбекистане, Mo-Cu-порфировые месторождения Актогайского (Актогай, Айдарлы) и Коксайского (Коксай) рудных полей в Казахстане. Названные объекты, принадлежащие двум рудно-формационным типам медно-порфирового семейства, различаются составом рудоносных плутоногенных формаций (Na-K для среднеазиатских месторождений и K-Na для казахстанских) и соответственно рудно-метасоматической зональностью и минералого-геохимическими особенностями руд, что отражено в многочисленных публикациях [15, 18, 20 и др.]. Кроме того, они различаются составом пород интрузивной

рамы, формами порфировых штоков и сопряжённых с ними рудоносных штокверков, что послужило основанием для отнесения к разным типам морфологической классификации рудных тел МПМ [11, 17 и др.].

**Методика исследований** включала:

- детальную минералого-петрографическую документацию керна разведочных скважин по профилям вкрест простирания основных рудоконтролирующих структур МПМ с оценкой характера и степени гидротермально-метасоматических изменений пород и минерального состава руд (с отбором образцов для лабораторно-аналитического изучения);
- оценку прожилковой массы разновозрастных минеральных ассоциаций в объёме вмещающих пород (в %), для чего по десятиметровым интервалам керна скважин проводился учёт количества и мощности встреченных прожилков и жил различного минерального выполнения;
- геологическое картирование стенок Кальмакырского карьера с массовыми замерами ориентировки прожилков и жил рудообразующих минеральных ассоциаций;
- микроскопическое изучение пород и руд;
- определение физико-механических свойств пород (плотности, фильтрационных и упруго-прочностных параметров, твёрдости и др.) с использованием аппаратуры кафедры полезных ископаемых МГУ по методике В.И. Старостина [2] по образцам керна скважин, отобранным с интервалом 40–50 м и менее (до 5–1 м по рудным интервалам).

По результатам выполненных работ, с учётом данных опробования, были отстроены геологические планы и разрезы месторождений масштаба 1:5 000–1:2 000, отражающие метасоматическую зональность, морфологию рудных тел и распределение прожилковой массы рудных и пострудных минеральных ассоциаций в объёме штокверков; составлены таблицы физико-механических свойств пород; по опорным профилям построены разрезы в изолиниях значений наиболее информативных петрофизических показателей (эффективной пористости ( $P_{эф}$ ), условно-мгновенного насыщения (А), постоянной насыщения (В), модуля Юнга (Е), твёрдости по Бринеллю (НВ) и рассчитанного по ним комплексного петрофизического (Кпк) и аномального рудопетрофизического (Кап) коэффициентов<sup>1</sup>); проанализированы зависимости перечисленных параметров от характера и степени метасоматических преобразований; по опор-

ным скважинам сопоставлены гистограммы изменений Кпк, Кап и содержаний меди в рудах.

Полученные данные, изложенные в [8, 9, 12, 17], позволили расшифровать строение рудоносных штокверков, установить тенденции их развития во времени и пространстве, определить направленность и масштабы изменения физико-механических свойств вмещающих пород в зависимости от наложенных преобразований, оценить возможность использования применённых методик детального картирования штокверков и петрофизического анализа для локального прогноза минерализованных зон. В настоящей статье основной акцент сделан на оценке влияния петрофизических параметров вмещающей среды на форму рудных тел и содержания металлов в рудах и в конечном итоге запасы месторождений. Хотя физико-механические свойства разнотипных пород изучены в обычных («комнатных») условиях, установленные отличия в параметрах с учётом экспериментальных данных позволяют прогнозировать их деформационное поведение в ходе формирования МПС. В целом на качественном уровне различие в деформационной реакции разнотипных сред на нагрузку сохраняется.

Из серии работ [3, 22, 26] известно, что глинистые, глинисто-карбонатные и солевые породы при высоких температурах и давлении отличаются повышенной способностью к пластическим деформациям. Учитывая, что внедрявшаяся магма превышала температуру вмещающей среды на сотни градусов и при этом создавала значительное избыточное давление, можно предположить, что названные породы испытывали преимущественно пластические деформации с частичным расплавлением (диссоциацией) термически «неустойчивых» мергелей, ангидритов, доломитов, в меньшей степени известняков и перекристаллизацией их в роговики и мраморы. При этом в интервале температур «жидкого» и «полужидкого» (суспензия) состояния гранитоидного расплава (от 900 до 650 °С) за счёт разложения наименее «устойчивых» доломитов могли высвободиться до 20–25 % первоначального их объёма. Значительная часть карбонатных толщ была ассимилирована магмой с образованием таких пород, как сиенито-диориты на Алмалыке [5] и «гибридные» монцититы на месторождении Бингхэм [38].

При высоких температурах и приложении скоротечных динамических нагрузок достаточной интенсивности доломиты, известняки, мергели, ангидриты, арсиллиты склонны к хрупкому разрушению, но при относительно продолжительных, а МПМ образуются в течение десятков–сотен тыс. лет, подвержены пластическому течению. Породы с «упругой» деформационной природой в таких условиях,

<sup>1</sup> Физический смысл отдельных петрофизических показателей и методика расчёта значений Кпк и Кап, используемых для их интерпретации, рассмотрены в [2, 9, 24 и др.].

особенно в присутствии флюидной фазы, испытывают интенсивное растрескивание; предел прочности «упруго-вязких» пород также существенно снижается. Отмеченные особенности деформационного поведения разнотипных сред были учтены при интерпретации данных проведённых исследований.

**Геолого-структурные условия локализации месторождений, строение рудоносных штокверков, физико-механические свойства вмещающих пород.** Au-Mo-Cu-порфировые месторождения Узбекистана, в разведке которых участвовали С. Т. Бадалов, Е. Р. Бутъева, В. Ф. Викторов, В. Г. Гарьковец, И. М. Голованов, В. Ю. Деды, Б. А. Дё, Р. А. Мусин, А. Т. Рахубенков, В. В. Чупров и другие советские геологи, сосредоточены в *Алмалыкском рудном районе (РР)* Кураминской металлогенической зоны (МЗ) и генетически связаны с габбро-диорит-монцодиорит-гранодиоритовой формацией (алмалыкским комплексом,  $C_2$ ) раннего этапа формирования Бельтау-Кураминского ВПП. В рудном районе, эквивалентном крупной рудно-магматической системе (РМС) с комплексной металлогенией (кроме медно-порфировых в её пределах присутствуют жильные золото-кварцевые, золото-полисульфидные и стратиформные колчеданно-полиметаллические месторождения), выделены три рудных поля (РП): *Алмалыкское* с месторождениями Кальмакыр, Карабулак, Дальнее (Ёшлик), Северо-Западный Балыкты, являющиеся участками гигантского объекта, часто называемого «Большим Алмалыком» с запасами Cu > 23 млн т (при среднем содержании 0,39%), Mo – 140 тыс. т (0,002%), Au – 2250 т (0,37 г/т), Ag – 13,4 тыс. т (2,20 г/т) [42], *Каульдинское* с Нижнекаульдинским рудопроявлением и *Саукбулакское* с рядовыми по запасам месторождениями Кызата (2 млн т (0,85%)) и Сары-Чеку (0,5 млн т Cu (0,49%)). Все перечисленные объекты сопряжены со штоками гранодиорит-порфиров – монцонит-порфиров завершающей фазы продуктивной плутоногенной формации (рис. 1). Вытянутые в плане и преимущественно крутопадающие в разрезе порфировые штоки представляют собой выступы-апофизы гигантского, по-видимому, единого на глубине, полихронного ( $C_1-C_3$ ) плутона, сложенного фанеритовыми габброидами и гранитоидами Na-K профиля. Он сформировался на восточном фланге обширного выступа фундамента, испытывавшего длительное (с силура до перми) воздымание с сокращением мощностей перекрывающих стратифицированных комплексов, «подавлением» вулканизма и интенсивным проявлением интрузивного магматизма в обстановке коллизионного сжатия.

Месторождения характеризуются однотипной метасоматической зональностью, которая в целом соответствует «монцонитовой» модели, разработанной Дж. Лоуэллом и Дж. Джильбертом [34], и близкими

структурно-текстурными и минералого-геохимическими особенностями руд, что позволяет предположить для них единый «материнский» магматический очаг. Вместе с тем, локальные геолого-структурные условия рудообразования на названных РП существенно различаются, что отразилось на морфологии и строении рудоносных штокверков и в конечном итоге на запасах руд и содержаниях металлов.

*Алмалыкское РП* расположено в пределах одноимённого массива габбро-диоритов – диоритов – сиенито-диоритов, вскрытого эрозией в северо-западной части Алмалыкского РР и занимающего не менее половины его площади в 850 км<sup>2</sup>. Этот массив, слагающий ядро магматогенного поднятия, может рассматриваться в качестве неглубоко залегающего «материнского» плутона (промежуточного очага), к выступу-апофизе которого – крупному интрузиву гранодиорит-порфиров – кварцевых монцонит-порфиров приурочено крупнейшее Алмалыкское Au-Mo-Cu-порфировое месторождение. Кальмакырским и Карабулакским разломами рудное поле разбито на три тектонических блока: Северный, Центральный и Южный, а месторождение – на несколько участков, традиционно упоминаемых как отдельные объекты. Рудоносные штокверки охватывают эндо-экзоконтактные зоны порфировых штоков, которые являются «ветвями» упомянутого, сложного по форме интрузива, контролирующимися древними разломами СЗ (Кальмакыр, Северо-Западный Балыкты), В-СВ (Дальнее) и субширотного (Карабулак) простираения. Пострудные взбросово-сдвиговые перемещения по ним обусловили различный уровень эрозии месторождений: умеренный на Кальмакыре и Северо-Западном Балыкты, малый на Карабулаке и Дальнем [25].

Основные запасы руд месторождений сосредоточены в гидротермально изменённых сиенито-диоритах, в меньших объёмах в гранодиорит-порфирах, монцонит-порфирах, диоритах и риодацитах (рис. 2). Метасоматическая зональность отвечает ряду зон, сменяющих друг друга в направлении от порфировых интрузивов во вмещающие породы: кварцевая, биотит-калишпатовая, филлизитовая (наложена на предшествующую, сохранившуюся фрагментарно) и пропилитовая (рис. 3), которые по количественным соотношениям основных новообразованных минералов могут быть разделены на подзоны. Рудные тела (РТ), конформные апикальным частям порфировых штоков, геометрически описываются сочетанием разновысоких эллиптических параблоидов, вложенных друг в друга, и отнесены ко *второму морфологическому типу*, однако в продольных разрезах они имеют уплощённые верхние ограничения, которые отражают «экранирующее» влияние перекрывающей известково-доломитовой толщи, в значительной

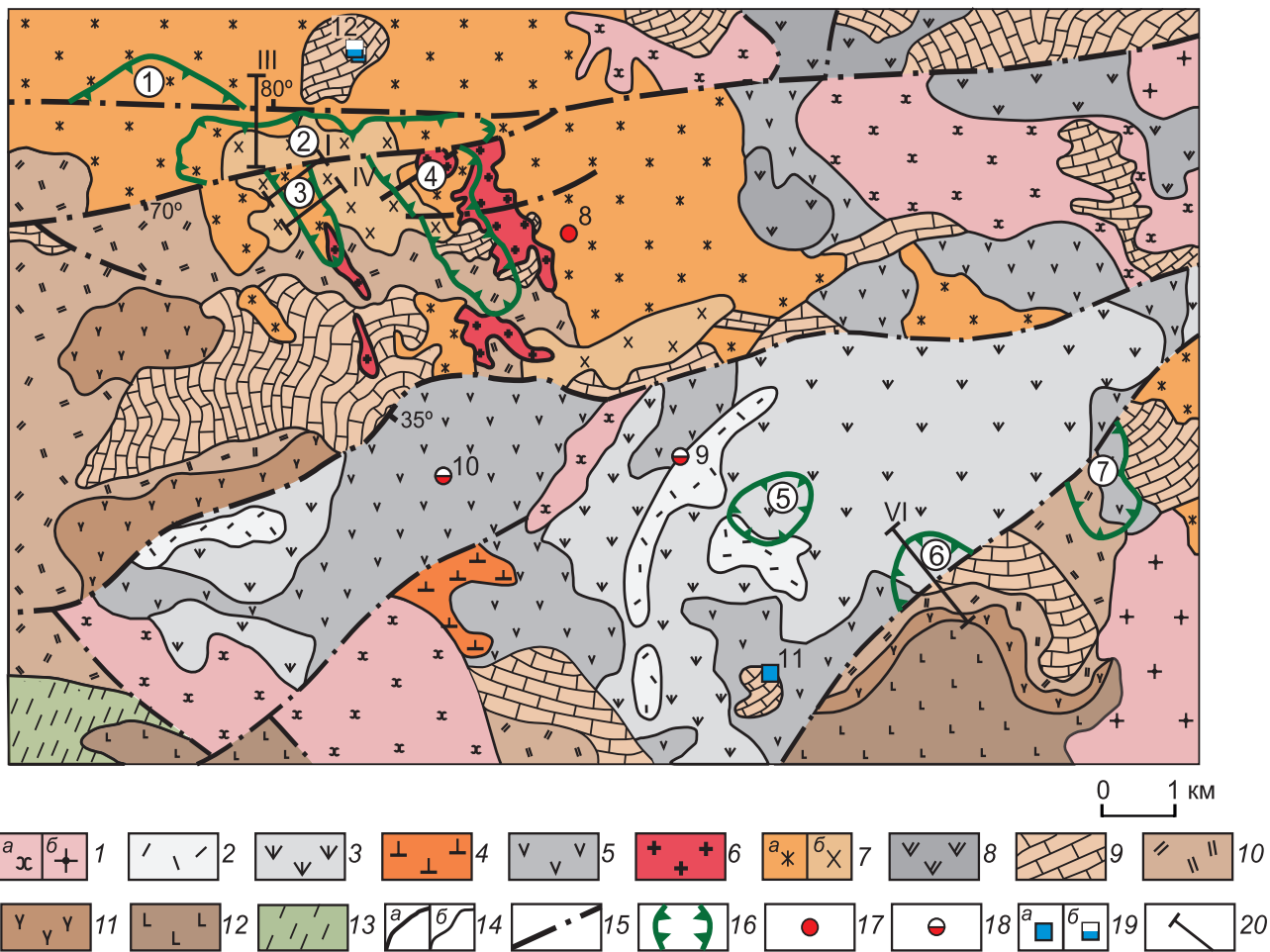
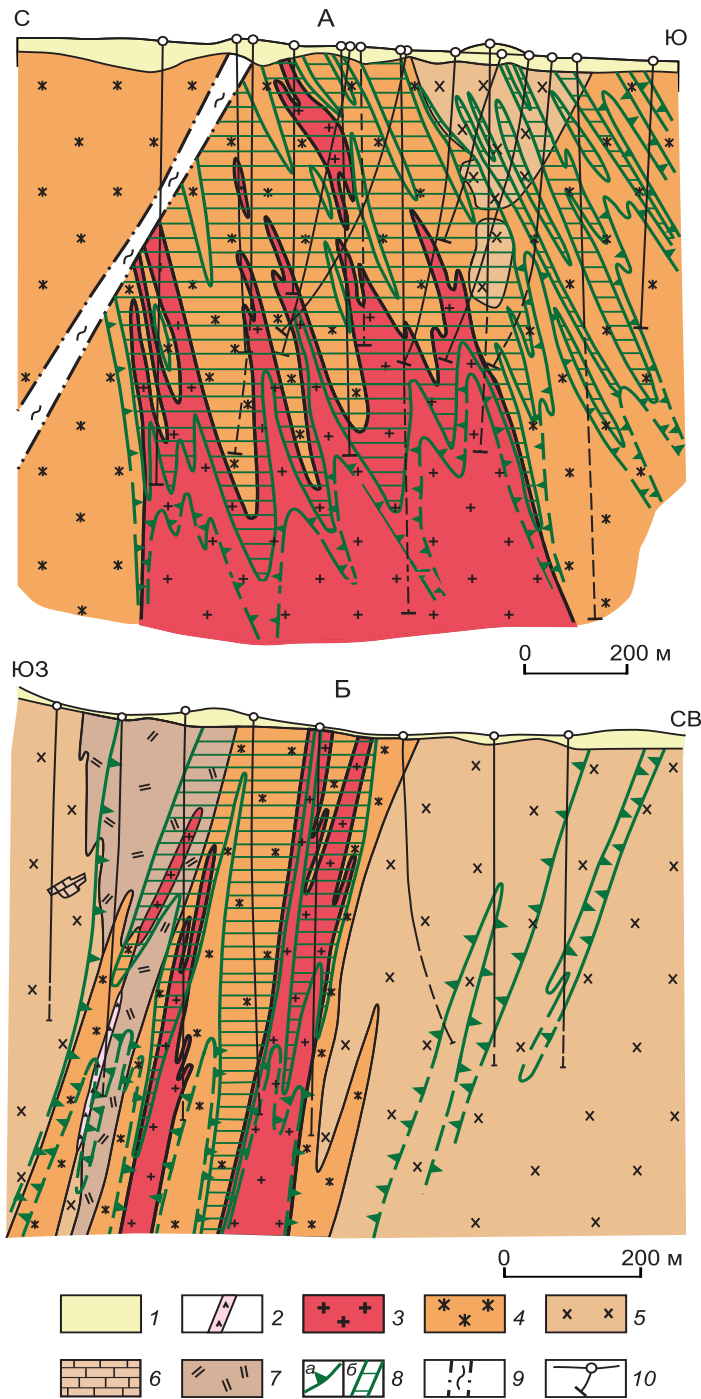


Рис. 1. Схематическая геологическая карта Алмалыкского рудного района. Составлена с использованием материалов Алмалыкской ГРЭ и САИГИМС [11]:

формации Бельтау-Кураминского вулканоплутонического пояса (ВПП): 1 – позднего этапа ( $C_3-P_1$ ): а – габбро-монцодиорит-монцонитовая, б – гранодиорит-адамеллитовая; 2–7 – раннего этапа ( $C_2m_1-C_3$ ): 2–5 – андезит-дацитовая, продуктивная на золото-гидрослюдисто-кварцевое оруденение: 2 – надакский андезидацит-дацитовый лавово-пирокластический комплекс, 3–5 – акчинский андезит-андезидацитовый экструзивно-лавово-субвулканический комплекс: 3 – надрудная андезидацитовая толща нерасчленённая, 4 – экструзивные купола андезидацитов ранней генерации, 5 – подрудная андезитовая толща, 6–7 – габбро-диорит-монцодиорит-гранодиоритовая формация (алмалыкский комплекс,  $C_2$ ), продуктивная на Au-Mo-Cu-порфировое оруденение: б – рудоносные гранодиорит-порфиры и кварцевые монцонит-порфиры, 7 – породы фанеритовых фаз: а – сиенито-диориты, б – диориты; 8–13 – фундамент ВПП: 8 – минбулакский трахибазальт-трахиандезит-дацит-риолитовый комплекс ( $C_2b$ ), 9 – доломиты и известняки с прослоями мергелей, песчаников, гравелитов, конгломератов ( $D_3-C_1$ ), 10–12 – андезибазальт-андезит-риодацитовая формация ( $D_1$ ): 10 – риодациты (кварцевые порфиры), 11 – андезиты, 12 – андезибазальты, 13 – дислоцированные терригенные и вулканогенно-терригенные отложения (O-S); 14 – геологические границы: а – рудоносных порфировых интрузивов, б – вмещающих и более поздних пород; 15 – основные разрывные нарушения; 16 – горизонтальные проекции (на дневную поверхность) штокверковых рудных тел Au-Mo-Cu-порфировых месторождений, их номера: Карабулак (1), Дальнее (2), Северо-Западный Балыкты (3), Кальмакыр (4), Нижнекаульдинское (5), Кызата (6), Сары-Чеку (7); месторождения и проявления иных рудно-формационных типов, их номера: 17 – золото-кварцевые жильные: Актурпак (8), 18 – золото-гидрослюдисто-кварцевые: Каульдинское (9), Бичанзор (10); 19 – стратиформные колчеданно-полиметаллические в карбонатной толще: а – необразованное Кульчулак (11), б – частично регенерированное Кургашикан (12); 20 – линии опорных профилей, по которым проведены специализированные исследования

степени ассимилированной диоритами главной фазы массива (с образованием сиенито-диоритов). Реликты (ксенолиты) этой толщи отмечаются на верхних горизонтах карьера и устьях разведочных скважин Кальмакырского месторождения [11].

Молибденово-медные с золотом руды образованы вкрапленностью и гнездами сульфидов, сульфидно-кварцевыми прожилками и более редкими жилами. Ориентировка рудных прожилков и жил, в большинстве своём обладающих средними и крутыми



**Рис. 2.** Au-Mo-Cu-порфировые месторождения Алмалыкского рудного поля: А – Дальнее, Б – Северо-Западный Балыкты. Геологические разрезы по профилям III и IV. Составлены с использованием материалов Алмалыкской ГРЭ:

1 – рыхлые отложения (Q); 2 – дайка диоритовых порфиров (C<sub>3</sub>?); 3–5 – рудоносный алмалыкский интрузивный комплекс (C<sub>2</sub>): 3 – гранодиорит-порфиры, монцонит-порфиры, 4 – сиенито-диориты, 5 – диориты; 6–7 – породы интрузивной рамы: 6 – мраморы (D<sub>3</sub>-C<sub>1</sub>), 7 – риодациты (D<sub>1</sub>); 8 – рудное тело, оконтурированное по бортовому содержанию меди 0,4 % (а) и 0,7 % (б); 9 – зона Карабулакского глубинного разлома; 10 – разведочные скважины

углами падения, определяется морфологией кровли порфировых интрузивов, что свидетельствует о едином плане деформаций в период становления рудоносных магматических тел и возникновения рудовмещающих трещин преимущественно сколового типа. В соответствии с пространственной ориентировкой древних тектонических структур, контролирующих порфировые интрузивы, на Дальнем и Карабулаке преобладают прожилки и жилы субмеридионального и субширотного простираний, на Кальмакыре и Северо-Западном Балыкты – субширотного и северо-западного. Пострудные трещины, выполненные барит-ангидритовой и цеолит-карбонатной минеральными ассоциациями, контролируются крупными и оперяющими их разломами и в определённой степени наследуют рудовмещающую трещиноватость.

Преобладающие во внутренних частях метасоматических колонок убогие вкрапленные руды по вертикали и латерали сменяются вкрапленно-прожилковыми, а затем прожилково-вкрапленными, существенно пиритовыми («пиритовый» ореол), на фоне которых встречаются отдельные мощные жилы с Au-Ag-полиметаллической минерализацией. В том же направлении, как показала детальная документация штокерков Дальнего и Северо-Западного Балыкты, ранние кварц-калишпатовая с молибденитом, кварц-магнетитовая и кварц-молибденит-пиритовая минеральные ассоциации сменяются главными продуктивными кварц-молибденит-халькопирит-пиритовой и кварц-пирит-халькопирит-борнитовой с самородным золотом и реликтовым магнетитом и далее на фланги МПС поздними кварц-полисульфидной (с Au и Ag) и кварц-энаргит-блэклюдной. Завершающие (кварц)-халькопирит-пиритовая и (кварц)-пиритовая ассоциации («сухие» прожилки практически без жильного сопровождения) тяготеют к осевой зоне штокерка (рисунки 4, 5). Объёмы прожилковой массы в оруденелых породах составляют от десятых долей–первых % для ранних и поздних ассоциаций до 8–10 % (в среднем от 3 до 4–5 %) для главной продуктивной.

Рудовмещающие породы по фильтрационным и упруго-прочностным параметрам могут быть отнесены к упругому типу сред, то есть склонны к хрупким деформациям (растрескиванию). Для изменённых в средней и интенсивной степени диоритов, сиенито-диоритов, гранодиорит-порфиров, кварцевых монцонит-порфиров и риодацитов характерны сравнительно высокие ёмкостные показатели ( $\Pi_{эф}$ , А, В) и пониженные значения модулей упругости (Е, G, K<sub>сж</sub>) и твёрдости (НВ); значения коэффициента Пуассона ( $\mu$ ) до 0,28 и лишь в единичных случаях (при сильной

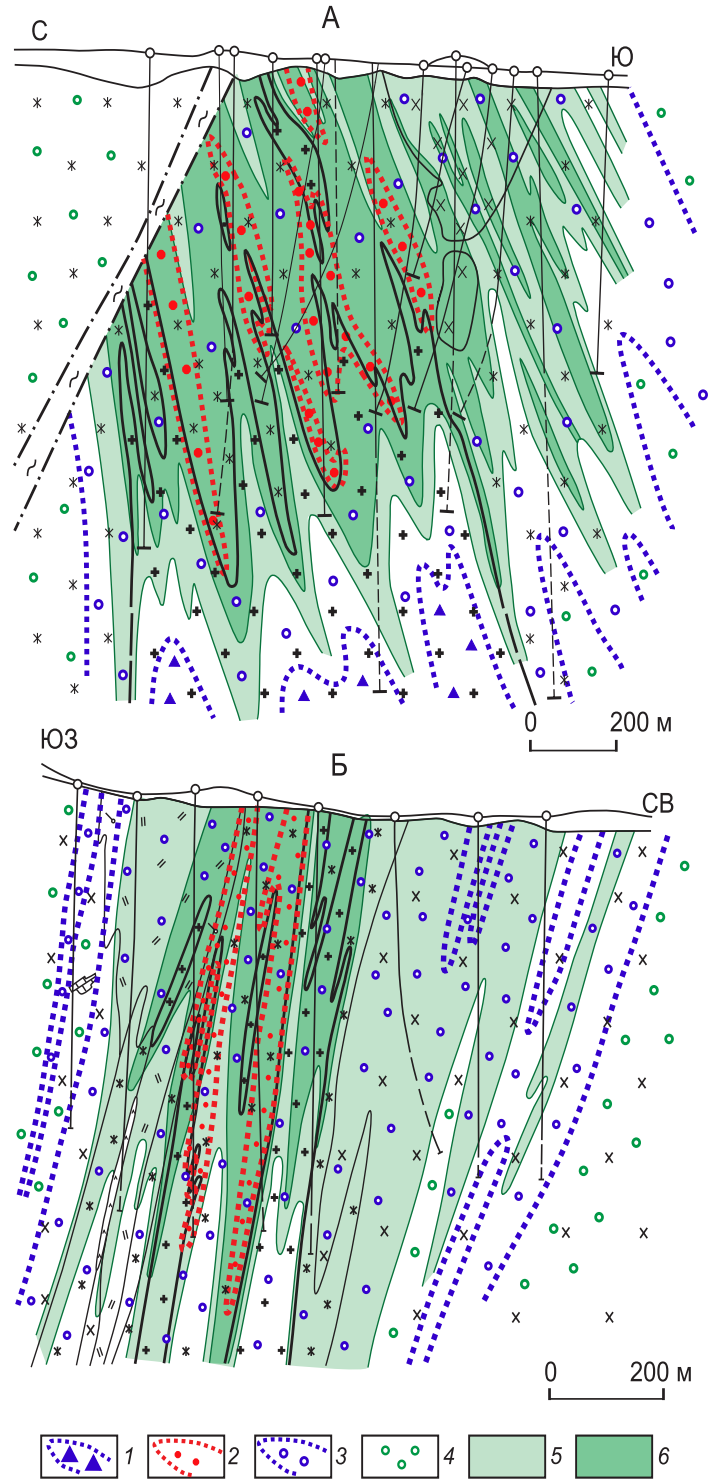
степени серицитизации, окварцевании или пропилитизации) – до 0,30–0,31. Значения комплексного петрофизического коэффициента (Кпк) для них варьируют в широком диапазоне, но, как правило, выше –0,80. Более низкие его значения (от –0,90 до –1,34) установлены для наименее изменённых, а также нацело окварцованных гранитоидов, ёмкостные и упруго-прочностные параметры которых приближаются к показателям упруго-вязких сред (табл. 1).

Для мраморов, слагающих провисы кровли Алмалыкского интрузивного массива и многочисленные ксенолиты в нём, определены аномально низкие значения фильтрационных параметров и твёрдости, средние значения модулей упругости, повышенные коэффициента Пуассона ( $\mu$ ) до 0,32, резко отрицательные Кпк до 1,33, что отражает малую проницаемость и способность к пластическим деформациям.

Таким образом, останцы практически полностью ассимилированной малопроницаемой карбонатной толщи в кровле рудоносного массива и в меньшей степени породы его фанеритовых фаз (диориты, сиенито-диориты) могли играть роль «флюидоупоров» для металлоносных растворов, способствуя рудонакоплению. Раннее высокотемпературное К-кремниевое изменение и более позднее кислотное выщелачивание гранитоидных пород привели к значительному росту их фильтрационных характеристик, снижению упругости и твёрдости. Способность к хрупкому разрушению и проницаемость для гидротермальных растворов существенно возрастают. Рудовмещающие фации метасоматитов могут быть выделены по значениям  $K_{пк} > -0,5$  и  $K_{ап} > 2,0$  (см. рис. 6, табл. 1), что может быть использовано в качестве дополнительного петрофизического критерия при оконтуривании минерализованных зон.

Установленное для месторождений Алмалыкского РП строение рудоносных штокверков свидетельствует о центробежной тенденции их эволюции от ранней к поздней стадии формирования, сменяющейся центростремительной на завершающей стадии (см. рисунки 4, 5). Штокверки, сформированные в рассмотренной структурно-петрофизической обстановке, обладают значительными размерами и вертикальным размахом (до 1 км и более), отчётливой концентрической зональностью, сравнительно невысокими содержаниями металлов в рудах, широкомасштабными надрудными геохимическими ореолами. При этом основные запасы руд сосредоточены в надинтрузивных зонах.

Принципиально иные геолого-структурные условия локализации Au-Mo-Cu-порфировых объектов *Каульдинского и Саукбулакского РП* в центре и на



**Рис. 3. Au-Mo-Cu-порфировые месторождения Алмалыкского рудного поля: А – Дальнее, Б – Северо-Западный Балыкты. Метасоматическая зональность и меднорудное тело в разрезах по профилям III и IV:**

1–4 – зоны гидротермально-метасоматических изменений: 1 – кварцевая, 2 – биотит-калцикатовая, 3 – филлизитовая, 4 – пропилитовая; 5–6 – рудное тело, оконтуренное по бортовому содержанию меди: 5 – 0,4 и 6 – 0,7 %; см. условн. обозн. к рис. 2

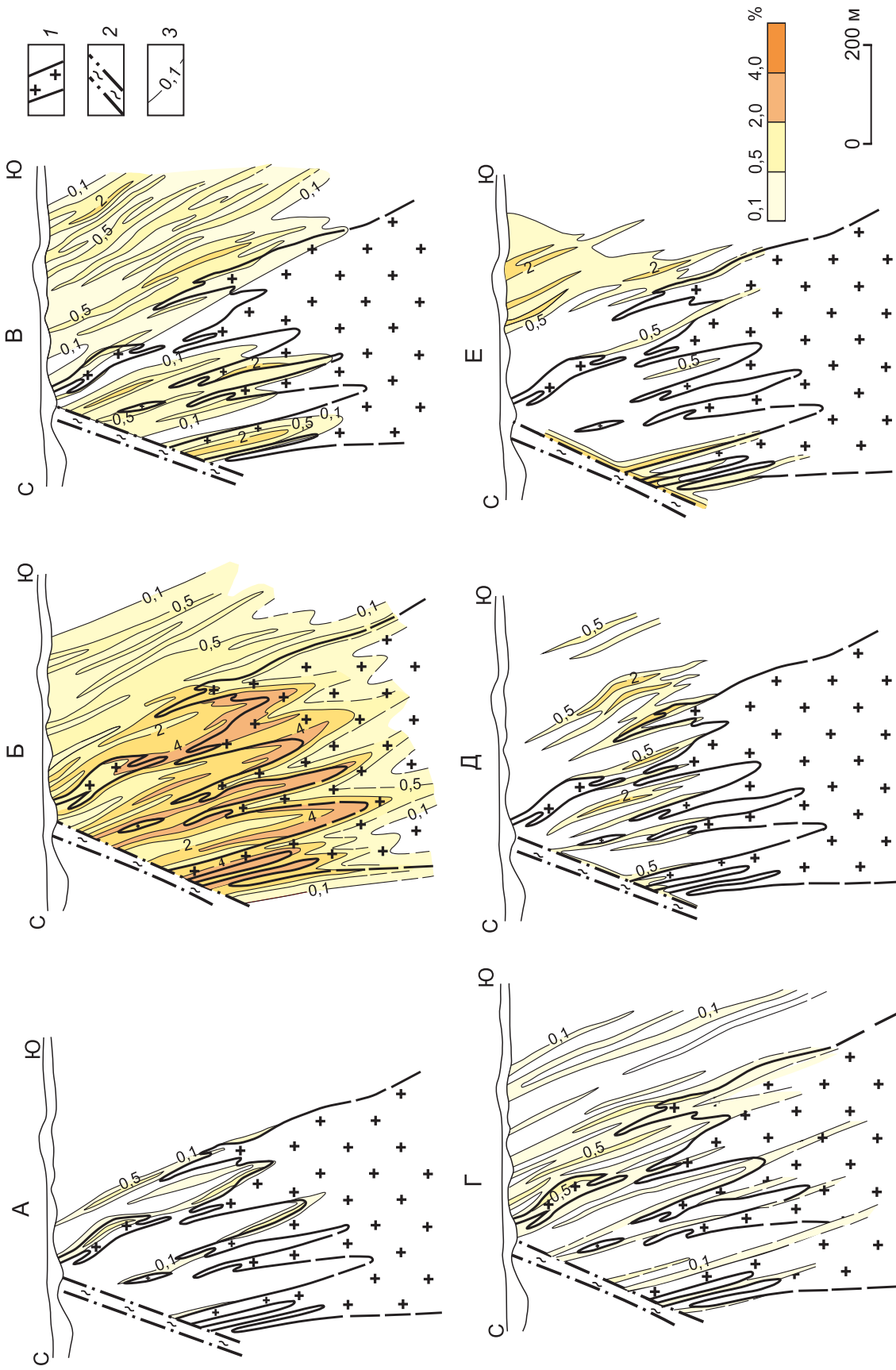


Рис. 4. Строение штокерка месторождения Дальнее в разрезе по профилю III:

распределение объёмов прожилковой массы разновозрастных минеральных ассоциаций: А – кварц-калишпат-молибденитовой, кварц-магнетитовой, кварц-молибденит-пиритовой, Б – кварц-молибденит-пирит-халькопиритовой и кварц-пирит-халькопирит-борнитовой с самородным золотом и реликтовым магнетитом, В – кварц-полисульфидной с золотом и серебром и кварц-энаргит-блэкклорудной, Г – (кварц)-халькопирит-пиритовой и (кварц)-пиритовой, Д – барит-анкеритовой, Е – цеолит-карбонатной; 1 – рудоносный порфировый шток; 2 – зона Карабулакского разлома; 3 – изолинии объёма, занимаемого прожилками и жилами в минерализованных породах, в %

юго-западном фланге Алмалыкского РР. Находящиеся здесь, в основании и прибортовых частях Центрально-Алмалыкского вулcano-тектонического грабена, рудопроявление Нижне-Каульдинское и месторождения Кызата и Сары-Чеку приурочены к лакколитоподобным штокам гранодиорит-порфиров – кварцевых монцонит-порфиров. В отличие от МПМ Алмалыкского РР они локализованы во внутриинтрузивных зонах, обладают эллипсоидной формой рудных тел в плане и линзообразной в разрезах, что послужило основанием отнесения к *четвёртому морфологическому типу*. Первые два из названных объектов локализованы под толщей ( $D_3-C_1$ ) мраморизованных известняков и доломитов (с прослоями мергелей, песчаников и гравелитов) и залегающих на них более поздних вулканитов андезит-дацитовой формации ( $C_2m-C_3$ ), выполняющих грабен. Третье, выведенное эрозией на дневную поверхность месторождение Сары-Чеку расположено в приподнятом юго-восточном тектоническом блоке. Оно является частью некогда единого с Кызатой объекта, «разорванного» взбросо-сдвигом по зоне Мисханского глубинного разлома с амплитудой вертикального перемещения в 500–700 м, горизонтального – в 2,0–2,5 км [1, 5] (см. рис. 1).

Перекрывающая карбонатная толща при внедрении фанеритовых и завершающей порфировой фаз плутона на рассматриваемых объектах была ассимилирована лишь частично и полностью не прорвана. На *месторождении Кызата* её мощность до 450–500 м (рис. 7). Причиной являлось, вероятно, недостаточное магматическое давление в периферийной области «материнского» плутона, в результате чего рудоносные порфировые тела «расплылись» под толщей доломитов и известняков, приобретя грибообразную форму.

Гранодиорит-порфиры, кварцевые монцонит-порфиры, эруптивные брекчии, фанеритовые сиенитодiorиты алмалыкского комплекса, а также аляскиты ( $D-S$ ), андезиты ( $D$ ), гравелиты и конгломераты ( $C$ ) субстрата ВПП обладают упруго-хрупкой деформационной природой (упругий тип сред), о чём свидетельствуют их фильтрационные и упруго-прочностные свойства (табл. 2). Ёмкостные параметры, модули упругости, твёрдость, значения  $\mu$  и Кпк рудовмещающих гранитоидов близки к установленным на МПМ Алмалыкского РР (см. табл. 1). Лишь наименее изменённые их разности имеют параметры, приближающиеся к упруго-вязким средам.

Перекрывающие мраморизованные доломиты и известняки ( $D_3$ ) характеризуются аномально низкими фильтрационными свойствами, средними значениями модулей упругости, высокими – температуры Дебая ( $\theta$ ) и малой твёрдостью. Значения  $\mu$  – 0,30–0,36,

Кпк от –1,35 до –0,57, в среднем –0,90. Они могут быть отнесены к упруго-пластичному типу сред. Примерно такими же параметрами обладают известковистые песчаники и ангидриты, слагающие прослой в карбонатной толще. По экспериментальным данным [3, 22, 26], подобные карбонатные и солевые породы при высоких температурах и давлении подвержены пластическому течению.

Скарны, развитые по доломитам и известнякам в экзоконтактах интрузива, выделяются повышенными ёмкостными и пониженными упруго-прочностными параметрами. Значения Кпк от –0,58 до –0,11, в среднем –0,39. Близкими к ним показателями пористости, упругости, твёрдости обладают вышележащие умеренно изменённые (синвулканическими гидротермальными процессами) андезиты и андезидациты акчинской толщи ( $C_2m_1$ ); Кпк от –0,52 до –0,19, в среднем –0,40, для интенсивно преобразованных разностей – 0–0,14 (0,07). На их «фоне» выделяются андезидациты субвулканического тела со сравнительно низкими ёмкостными параметрами и повышенными показателями упругости. Кпк от –0,99 до –0,60, в среднем –0,80 (для малоизменённых разностей).

Петрофизическая гетерогенность геологических разрезов Каульдинского и Саукбулакского РР (МПС), а именно наличие малопроницаемой, способной к пластическим деформациям, терригенно-карбонатной толщи над порфировыми штоками и вмещающих фанеритовых гранитоидов, склонных к хрупкому разрушению, привела к уплощённым формам апикальных частей рудоносных интрузивов, сопряжённых с ними метасоматических и минерализованных зон, а также совмещению в пространстве разновозрастных минеральных ассоциаций, как это можно видеть на примере *месторождения Кызата* (рисунки 8, 9). Реликты ранней биотит-калишпатовой зоны сохранились здесь лишь в прикорневой части порфирового штока, контролируемой зоной Мисханского глубинного разлома. Наложённая филлизитовая зона полностью охватывает интрузив, окружающие сиенито-диориты, аляскитовые граниты и имеет линзовидную морфологию. Причём наивысшая степень кислотного выщелачивания (внутренняя подзона) отмечается в апикальных частях порфирового штока, на контактах с которыми перекрывающие доломиты и известняки скарнированы (на первые метры). Полого залегающее меднорудное тело с вертикальной мощностью до 150 м (при оконтуривании по бортовому содержанию  $Cu$  0,5 %) и до 300 м (при 0,2 %) при простой морфологии нижнего ограничения имеет ряд ответвлений в висячем боку, полностью конформных апофизам рудовмещающего порфирового штока.

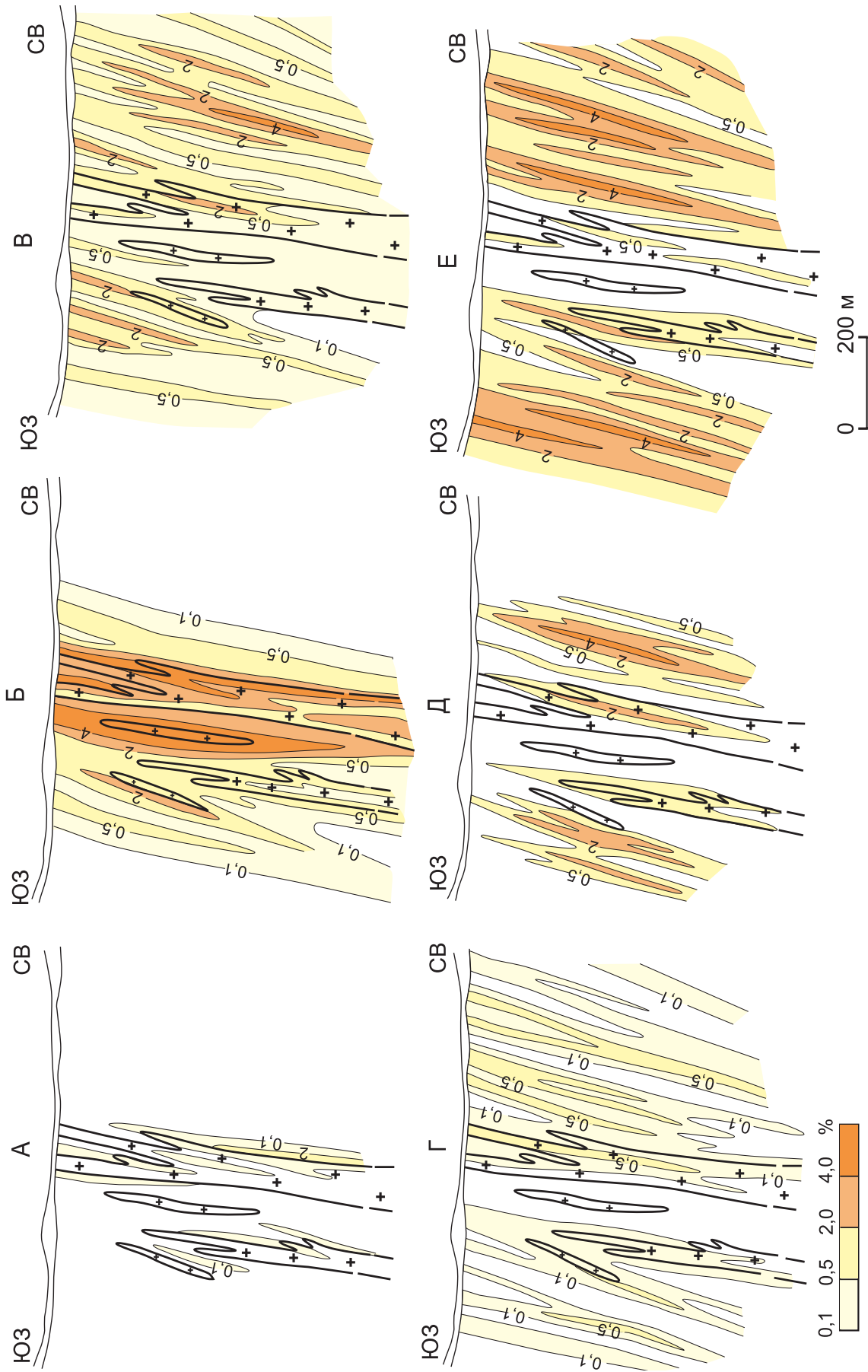


Рис. 5. Стрение штокверка месторождения Северо-Западный Балукты в разрезе по профилю IV: см. услов. обозн. к рис. 4

1. Физико-механические свойства пород Au-Мо-Си-порфировых месторождений Алмалыкского рудного поля

Исходные породы	Метасоматические зоны и подзоны МПС		Новообразованные минеральные ассоциации	Интенсивность изменения	n	ρ	P <sub>эф</sub>	A	B	μ	E	G	K <sub>сж</sub>	НВ	Кпк	Кап		
	Зона	Подзона																
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17		
Гранодиорит-порфиры (C <sub>2</sub> )	Филлизитовая	ХМС	Хл-Сер	I	14	2,64	0,41	0,18	0,029	0,26	7,10	2,81	5,01	245	-0,94	1,00		
				II	12	2,63	0,89	0,34	0,084	0,27	6,46	2,53	4,75	194	-0,40	2,21		
				III	4	2,57	3,58	1,21	0,144	0,23	4,37	1,78	2,77	83	0,52	5,05		
					Хл-Му-Сер	III	4	2,63	1,96	0,54	0,069	0,27	5,10	1,99	3,84	95	0,07	4,52
					Хл-Сер/Кар	III	2	2,59	1,52	0,68	0,192	0,30	5,11	1,96	4,30	227	0,47	3,39
				КХС	Му-Сер/Кар	III	2	2,65	1,36	0,27	0,044	0,26	5,79	2,29	4,08	142	-0,42	2,07
					Му-Сер	III	2	2,64	2,58	0,73	0,103	0,27	3,99	1,56	2,99	72	0,36	5,73
				КС	Кв-Хл-Сер	II	2	2,60	2,09	0,28	0,027	0,28	3,90	1,52	3,00	56	-0,26	3,19
					Кв-Му-Сер,	III	2	2,56	5,32	1,48	0,143	0,21	3,65	1,50	2,14	92	0,91	8,84
					Кв-Сер	III	3	2,55	5,90	2,44	0,080	0,18	3,22	1,36	1,77	60	0,88	2,56
					Кв-Сер/Кар	III	2	2,58	1,51	0,38	0,028	0,28	4,99	1,94	3,78	94	-0,49	2,78
					Сер-Кв	IV	2	2,71	0,82	0,41	0,063	0,24	(5,54)	2,21	3,69	166	-0,49	1,76
			Монокварцевая		Кв	IV	2	2,64	0,63	0,31	0,204	0,18	7,41	3,12	3,92	268	-0,04	3,46
Синитодориты (C <sub>2</sub> )	Филлизитовая	ХС	Хл-Сер	I	10	2,64	0,35	0,14	0,028	0,26	7,26	2,86	5,18	239	-1,08	1,00		
				II	5	2,64	0,83	0,21	0,062	0,26	6,95	2,75	4,96	216	-0,51	1,56		
				III	2	2,50	5,39	1,05	0,082	0,15	3,37	1,49	1,60	40	0,62	8,01		
					Хл-Сер/Кар	III	2	2,66	1,77	0,56	0,082	0,28	5,32	2,07	4,09	86	-0,08	3,67
				КХС	Кв-Хл-Сер	II	3	2,56	1,41	0,43	0,052	0,26	5,90	2,34	4,09	208	-0,21	2,68
					III	2	2,71	1,31	0,49	0,184	0,31	4,33	1,64	4,00	32	0,12	4,85	
				КС	Кв-Сер	III	3	2,51	6,30	1,76	0,209	0,26	3,23	1,37	2,36	49	1,11	10,63
					Кв-Сер/Кар	III	4	2,58	3,33	1,04	0,094	0,22	4,28	1,77	3,02	61	0,35	6,20
					Сер-Кв	IV	6	2,68	1,15	0,56	0,106	0,23	5,95	2,48	3,69	129	-0,16	3,18
					Сер-Кв/Кар	IV	2	2,70	1,15	0,30	0,075	0,30	4,55	1,74	3,87	76	-0,21	2,84
			Калишпатовая	БО	Би-Орт	II	4	2,59	0,76	0,31	0,119	0,28	6,79	2,64	5,27	235	-0,25	2,25
							III	2	2,59	1,74	0,63	0,093	0,27	5,61	2,19	4,25	159	0,06
				КО	Кв-Орт	I	2	2,61	0,64	0,20	0,053	0,26	6,74	2,66	4,78	171	-0,75	1,66
		II	6			2,63	0,46	0,18	0,031	0,26	6,91	2,71	5,07	222	-0,89	1,28		
		III	3			2,58	0,66	0,24	0,074	0,29	6,37	2,46	5,09	198	-0,56	1,86		
	Монокварцевая		Кв	IV	2	2,68	0,34	0,26	0,206	0,18	8,08	3,42	4,21	337	-0,15	2,31		
Диориты (C <sub>2</sub> )	Филлизитовая	АХА	(Би)-Амф	II	2	3,01	0,39	0,08	0,032	0,29	9,89	3,84	7,82	219	-1,20	1,31		
				III	2	2,72	0,88	0,76	0,224	0,29	7,35	2,85	5,89	187	-0,04	5,99		
					Алб-Хл-Акт	I	4	2,88	0,28	0,09	0,017	0,26	8,93	3,54	6,26	276	-1,34	1,00
						II	14	2,91	0,51	0,24	0,036	0,27	8,89	3,46	6,75	173	-1,05	1,85
						III	6	2,75	1,52	0,52	0,068	0,30	6,31	2,43	5,26	77	-0,36	4,53
				АЭЖХ	Алб-Эп-Кар-Хл	II	3	2,82	1,59	0,42	0,192	0,30	6,65	2,56	5,59	107	-0,19	5,48
					Эп-Хл	III	4	2,61	3,50	1,82	0,235	0,26	4,22	1,66	3,10	51	0,73	12,03
			ХС	Хл-Сер	II	9	2,86	0,54	0,24	0,032	0,27	8,60	3,34	6,64	214	-0,92	1,83	
						III	2	2,66	1,81	1,26	0,277	0,32	4,69	1,17	4,60	58	0,46	6,18
					Хл-Му-Сер/Кар	III	2	2,76	0,97	0,33	0,039	0,28	6,38	2,48	4,99	65	-0,74	8,75
						II	9	2,94	0,93	0,34	0,059	0,29	7,54	2,90	6,29	142	-0,64	3,04
						III	2	2,94	0,59	0,20	0,036	0,28	8,65	3,37	6,64	199	-0,95	2,96
		КХС		Кв-Му-Сер	III	2	2,63	3,55	1,26	0,059	0,31	4,39	1,67	3,89	63	0,25	7,41	
				Кв-Му-Сер/Кар	III	2	2,95	0,75	0,42	0,031	0,26	9,85	3,88	7,07	201	-0,79	2,31	
		КС	Сер-Кв	IV	2	2,92	0,56	0,18	0,029	0,25	10,23	5,07	6,97	243	-0,96	1,56		
			БО	Би-Орт	II	3	2,73	0,17	0,11	0,120	0,27	7,28	2,86	3,31	170	-1,06	3,52	

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	
Риодациты (кварцевые порфиры) Мраморы (D <sub>1</sub> )	Филлизитовая	XC	Хл-Сер	I	5	2,60	0,65	0,24	0,067	0,25	6,98	2,79	4,71	325	-0,35	1,00	
				II	6	2,56	1,60	0,47	0,099	0,25	6,29	2,51	4,20	238	-0,01	1,79	
			Му-Сер	II	3	2,64	1,79	0,65	0,074	0,24	5,91	2,37	3,89	149	-0,08	1,60	
				III	2	2,50	5,81	1,42	0,097	0,26	4,84	1,52	2,67	120	0,80	4,50	
		KXC	Кв-Хл-Му-Сер	II	2	2,56	1,41	0,40	0,034	0,21	6,02	2,47	3,56	107	-0,38	2,40	
				III	2	2,57	2,94	1,06	0,127	0,27	4,82	1,88	3,63	133	0,46	2,94	
		KC	Кв-Му-Сер	Кв-Му-Сер/Кар	III	2	2,65	2,62	0,86	0,071	0,28	4,93	1,93	3,79	139	0,20	2,67
					III	3	2,69	1,85	0,79	0,047	0,23	5,72	2,32	3,60	151	-0,15	2,04
Мраморы (D <sub>3</sub> )		Скарны	Акт-Кар-Эп-Маг	I	3	2,55	0,43	0,13	0,034	0,29	6,64	2,55	5,50	31	-1,33	1,00	
				IV	2	3,13	1,65	0,08	0,193	0,32	6,21	2,34	5,99	47	-0,34	2,37	

*Примечание.* Метасоматические подзоны: БО – биотит-ортоклазовая, КО – кварц-ортоклазовая, XC – хлорит-серицитовая, KXC – кварц-хлорит-серицитовая, KC – кварц-серицитовая, АХА – альбит-хлорит-актинолитовая, АЭКХ – альбит-эпидот-карбонат-хлоритовая (названы по основным новообразованным минералам). Степень преобразования исходных пород: I – слабая, II – средняя, III – интенсивная, IV – весьма интенсивная (полное замещение). Основные минералы метасоматитов (в названиях новообразованных ассоциаций перечислены в порядке увеличения частоты встречаемости): Акт – актинолит, Алб – альбит, Амф – амфибол, Би – биотит, Кар – карбонаты, Кв – кварц, Маг – магнетит, Орт – ортоклаз, Му – мусковит, Сер – серицит, Хл – хлорит, Эп – эпидот. Поздняя карбонатизация (/Кар), наложенная на метасоматиты филлизитовой зоны. Все выделенные минеральные ассоциации калишпатовой, филлизитовой и пропиловитовой зон в тех или иных количествах содержат рудные минералы: пирит, магнетит, халькопирит, борнит, молибденит и др. Физико-механические параметры (приведены средние значения):  $\rho$  – плотность (г/см<sup>3</sup>);  $P_{эф}$  – эффективная пористость (%); А – условно-мгновенное насыщение (%); В – постоянная насыщения (час<sup>-1</sup>);  $\mu$  – коэффициент Пуассона; модули упругости ( $\times 10^5$  кгс/см<sup>2</sup>): Е – Юнга, G – сдвига,  $K_{сж}$  – объёмного сжатия, НВ – твёрдость по Бринеллю (кгс/мм<sup>2</sup>); Кпк – комплексный петрофизический коэффициент; Кап – аномальный рудно-петрофизический коэффициент; n – количество проб.

В отличие от месторождений Алмалыкского РП на Кызате наряду с рудными прожилками и жилами со средними (30–60°) углами падения отмечается большое количество субгоризонтальных (0–30°), а их густота (количество на погонный метр) и средне-статистическая мощность существенно выше. Так, в интервалах богатых (Cu > 1 %) руд доля объёма прожилковой массы достигают 30 % и более (иногда до 60–80 %), что значительно больше, чем на Кальмакыре, Дальнем и Северо-Западном Балыкты, хотя среднее содержание меди (0,85 %) в штокверковых рудах выше лишь в два раза из-за сравнительно небольшого количества (до 5–7 %) сульфидов в прожилках и жилах.

«Подэкранная» обстановка формирования привела к спрессованности рудно-метасоматической колонки месторождения Кызата, сравнительно небольшому (до 250–300 м) размаху оруденения при угнетённом развитии надрудных геохимических ореолов, повышенным густоте рудных прожилков и жил и содержаниям металлов в рудах. Тем не менее детальным картированием штокверка по скважинам удалось установить элементы его зонального строения, в значительной мере «затушёванного» из-за наложения поздних новообразованных минеральных ассоциаций на ранние.

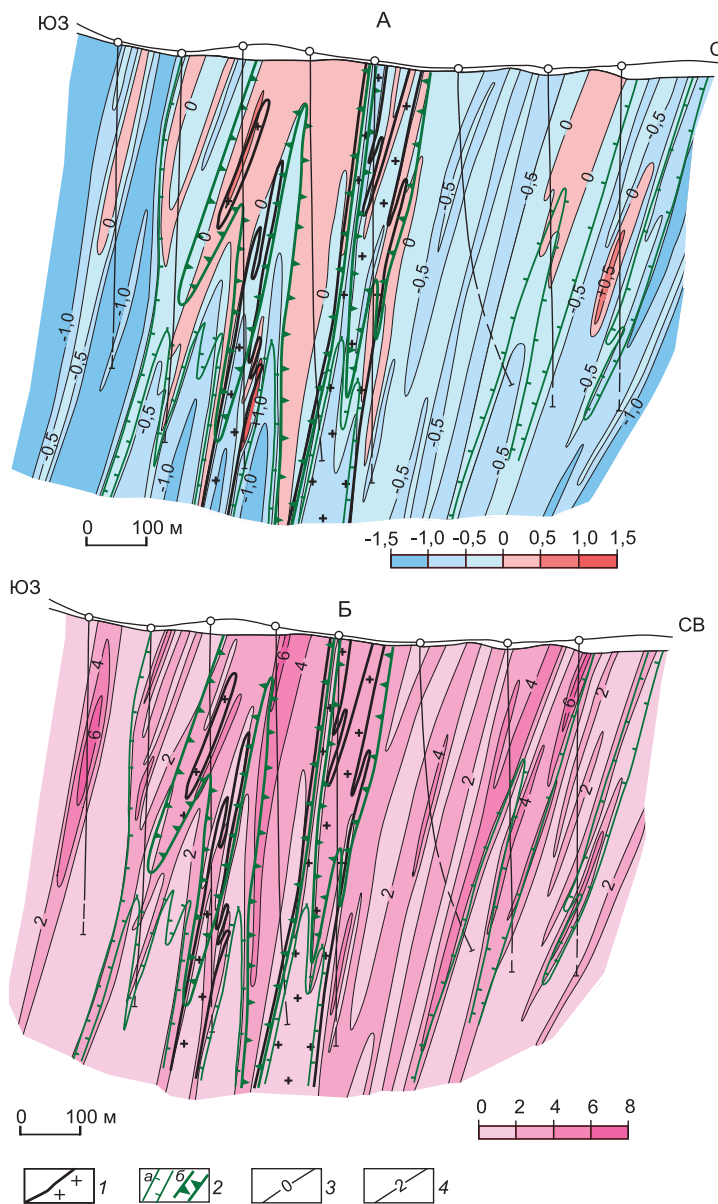
Прожилки ранних кварц-калишпат-молибденитовой и кварц-магнетитовой ассоциаций, сопряжённые с высокотемпературными биотит-ортоклазовыми метасоматитами, которые практически полностью «уничтожены» наложенным кислотным выщелачиванием, тяготеют к апикальным, приконтактовым областям порфирового штока. Ареал продуктивной кварц-молибденит-халькопирит-пиритовой ассоциации, охватывающий реликтовый участок биотит-калишпатовой зоны и внешнюю подзону филлизитовой, распространяется в более глубокие части интрузива, причём обогащённые его участки удалены от контактов с вышележащей карбонатной толщей на десятки–первые сотни метров. Поздняя кварц-полисульфидная ассоциация практически не развита. Прожилки завершающей (кварц-халькопирит)-пиритовой ассоциации приурочены к юго-западному флангу лежащего контакта минерализованной зоны – к надстволовой части порфирового интрузива, «срезанной» Мисханским разломом. Выявленные особенности строения штокверка, по-видимому, отражают центростремительную тенденцию его наращивания от ранней к поздней стадии развития. Она противоположна установленной для МПМ Алмалыкского РП.

Петрофизический разрез месторождения в изоляциях Кпк (рис. 10) имеет облик «слоёного пирога».

Минерализованная зона в апикальной части интрузива, оконтуренная по бортовому содержанию  $\text{Cu}$  0,2 %, и область скарнирования вышележащей карбонатной толщи «попадают» в поле значений  $\text{Kпк}$  от  $-0,4$  до  $-0,6$ . Для отдельных фрагментов рудного тела, оконтуренного по бортовому содержанию  $\text{Cu}$  1,0 % (участки сгущения рудно-прожилковой массы до 30 % и выше), отмечаются низкие значения  $\text{Kпк}$  до  $-0,80$  и менее, что может быть обусловлено «полным» заполнением порового и трещинного пространства минералами рудообразующих ассоциаций, приведшим к снижению ёмкостных и росту упруго-прочностных свойств рудовмещающих метасоматитов. Поля повышенных значений  $\text{Kпк}$  в стволовой (приразломной) части интрузива, а также в прилегающей экзоконтактовой области, сложенной интенсивно серицитизированными аляскитами (D-S), фиксируют, по-видимому, канал поступления растворов из магматического очага. При удалении от него на северо-запад появляется поле резких отрицательных значений ( $< -0,80$ ), фиксирующее малоизменённые сиенито-диориты и гранодиорит-порфиры.

Карбонатная толща, а также субвулканическое тело андезидацитов, слагающие среднюю часть геологического разреза месторождения, отражаются отрицательными полями  $\text{Kпк}$  – от  $-0,8$  до  $-1,0$  и ниже. Не исключено, что слабопроницаемые андезидациты, наименее изменённые разности которых по свойствам «приближаются» к упруго-вязким средам, наряду с мраморизованными доломитами и известняками, могли быть «флюидоупорами» для гидротермальных растворов, что отмечалось и для Нижне-Каульдинского рудопроявления [11].

**Коксайское РП** с одноимённым  $\text{Mo-Cu}$ -порфировым месторождением расположено в **Коксайском РР** Илийской МЗ верхнепалеозойского Балхашско-Илийского ВПП. Площадь рудного поля охватывает вытянутый в субширотном направлении Коксайский гранодиоритовый массив рудоносной габбро-диорит-гранодиоритовой формации  $\text{K-Na}$  профиля ( $\text{C}_{1-2}$ ) и вмещающие его породы выступа субстрата (фундамента) пояса – раннесилурийские кремнистые и перекрывающие их карбонатные толщи, имеющие моноклинальное залегание при крутом падении на юг. В строении выступа также участвуют граниты жолкалдыкского комплекса ( $\text{O}_3\text{-S}_1$ ) с ксенолитами кембрийских и рифейских габбро и диоритов. С севера массив «срезан» крупным Коксайским разломом, по которому южный блок РП надвинут на северный с амплитудой перемещения от 500 до 1000 м. На западе и юго-западе он погружается под толщу вулканогенно-осадочных ( $\text{C}_1\text{t-v}_1$ ) и вулканогенных ( $\text{C}_1\text{v}_3\text{-n}$ ) отложений. Хотя контакты массива с данной толщей осложнены разрывными нарушениями,



**Рис. 6. Месторождение Северо-Западный Балыкты. Разрезы по профилю IV в изолиниях: А – комплексного петрофизического коэффициента ( $\text{Kпк}$ ), Б – аномального рудно-петрофизического коэффициента ( $\text{Kap}$ ):**

1 – рудоносный порфировый шток; 2 – рудное тело, оконтуренное по бортовому содержанию меди: 0,4 % (а) и 0,7 % (б); 3 – изолинии  $\text{Kпк}$ ; 4 – изолинии  $\text{Kap}$

установлено, что гранодиориты прорывают пачку песчано-глинистых отложений в её основании; слагающие верхи разреза андезиты и андезидациты алтынэмальской свиты могут рассматриваться как их комагматы [19, 21].

**Коксайское месторождение** (3,1 млн т  $\text{Cu}$  при среднем содержании 0,42 %, KAZ Minerals, 2018 г.),

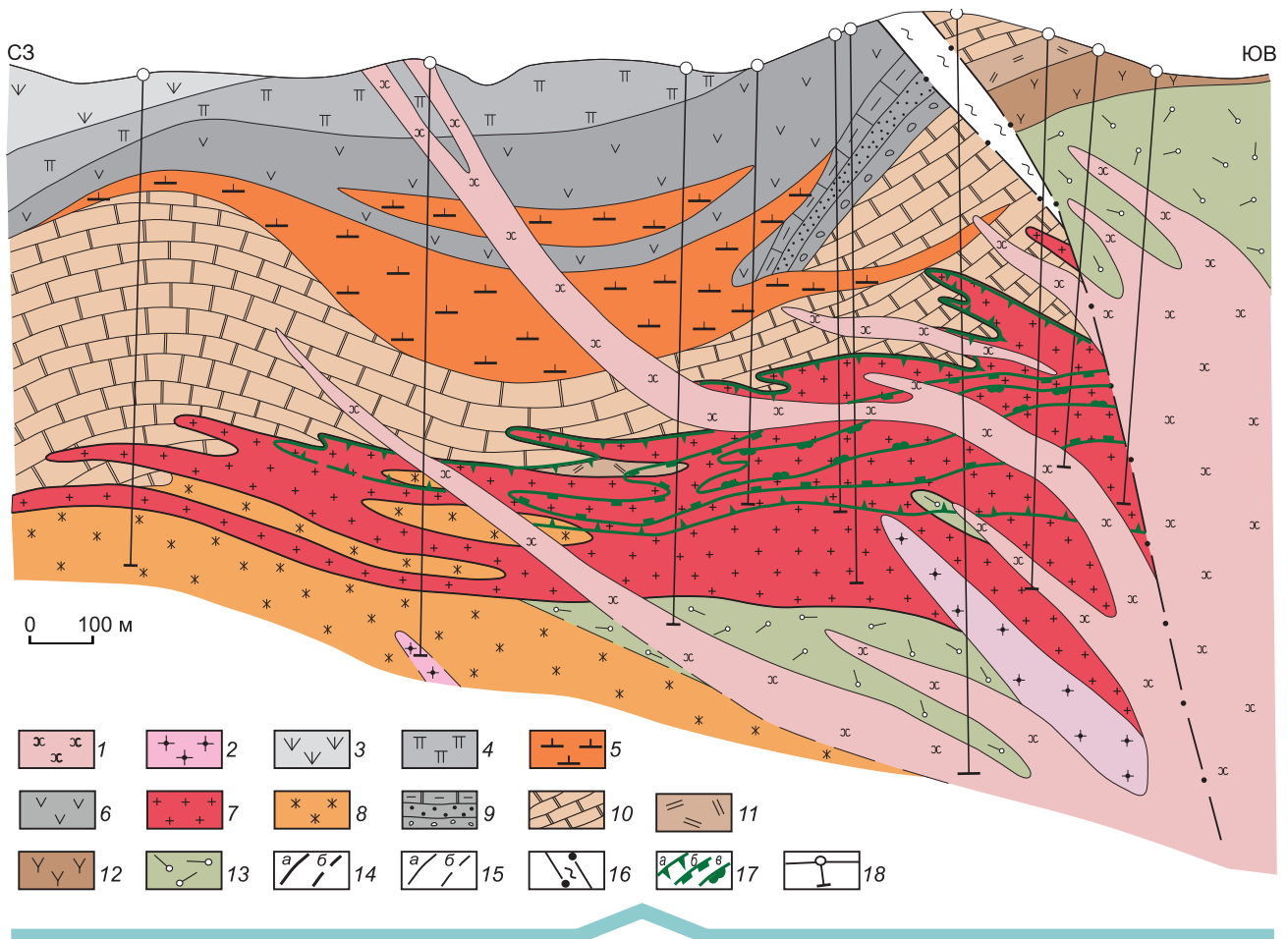
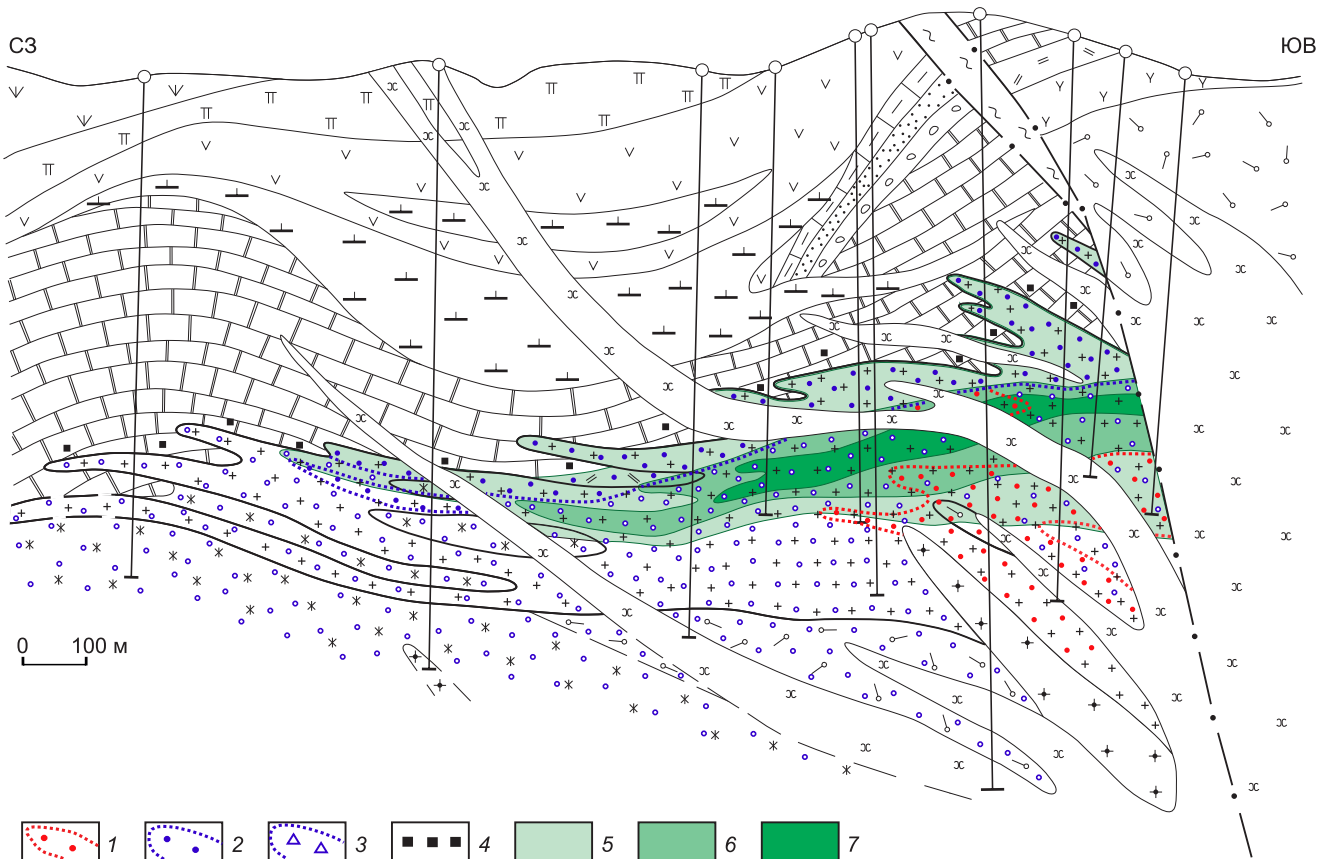


Рис. 7. Au-Mo-Cu-порфировое месторождение Кызата. Геологический разрез по профилю VI (со «снятыми» четвертичными рыхлыми отложениями). Составлен с использованием материалов Алмалыкской ГРЭ:

1–8 – формации нижнего СФЗ Бельтау-Кураминского ВПП: 1 – габбро-монцодиорит-монцонитовая ( $C_3$ ): монцонит-порфиры (гушсайский комплекс, 2 – гранодиорит-адамеллитовая ( $C_3$ ): гранодиориты, гранодиорит-порфиры (кунюдинский комплекс), 3–6 – андезидацитовая ( $C_2m_1$ ), продуктивная на низкотемпературное золото-кварцевое оруденение (акчинский экструзивно-лавово-субвулканический комплекс): 3 – средне- и 4 – мелкопорфировые андезидациты верхней толщи, 5 – экструзивные купола и субвулканические тела андезидацитов, 6 – мелкопорфировые андезиты нижней толщи, 7–8 – габбро-диорит-монцодиорит-гранодиоритовая (алмалыкский комплекс,  $C_2$ ), продуктивная на Au-Mo-Cu-порфировое оруденение: 7 – гранодиорит-порфиры и монцонит-порфиры рудоносные, 8 – сиенито-диориты; 9–13 – фундамент ВПП: 9–10 – терригенно-карбонатные отложения ( $D_3-C_1$ ): 9 – переслаивающиеся известняки, доломиты, мергели, песчаники, гравеллиты, конгломераты ( $C_1$ ), 10 – мраморизованные доломиты, известняки с прослоями песчаников ( $D_3$ ), 11–12 – андезибазальт-андезит-риодацитовая формация ( $D_1$ ): 11 – риодациты (кварцевые порфиры), 12 – андезиты, 13 – аляскитовые граниты (O-S); 14–15 – контакты пород, установленные (а) и предполагаемые (б): 14 – рудоносных порфировых интрузивов, 15 – вмещающих и пострудных пород; 16 – зона Минбулакского разлома (взбросо-сдвиговой кинематики); 17 – рудное тело, оконтуренное по бортовому содержанию меди 0,2 % (а), 0,5 % (б) и 1,0 % (в); 18 – скважины

в разведке и изучении которого принимали участие В.Е. Варнавских, В.В. Данчев, А.И. Кривцов, М.В. Кукарека, А.И. Полетаев, В.И. Сычев, В.М. Шепелев, В.К. Шульга и др., приурочено к поясу крутопадающих ( $70-80^\circ$ ) на север даек гранодиорит-порфиров и плагиигранит-порфиров, которые рассекают гранодиориты фанеритовой фазы массива и контролируют размещение околорудных метасоматитов и молибдено-медных штокверковых руд. На глубине

дайки «сливаются» в мощные тела субширотного простирания. Оруденелые гранодиориты и порфиры прорваны воронко- и дайкоподобными телами эруптивных брекчий, в обломках и цементе которых отмечается убогая рудная минерализация, а также пострудными штоками мелко- и среднезернистых гранитов ( $C_2$ ) и дайками габбро-диабазов (Р). С севера порфировые дайки и сопряжённые с ними минерализованные зоны срезаны Коксайским глубинным



**Рис. 8. Au-Mo-Cu-порфировое месторождение Кызата. Метасоматическая зональность и меднорудное тело в разрезе по профилю VI:**

метасоматические зоны МПС: 1 – реликты биотит-калишпатовой; 2–3 – подзоны филлизитовой: 2 – внутренняя (серицит-кварцевые, кварц-серицитовые, кварц-серицит-хлоритовые метасоматиты с карбонатами и пиритом), 3 – внешняя (хлорит-серицитовые и серицит-хлоритовые с эпидотом, карбонатами, пиритом, карбонат-серицитовые и серицит-кварцевые с пиритом (по аляскитам)); 4 – карбонат-хлорит-эпидот-актинолитовые скарны; 5–7 – рудное тело, оконтуренное по бортовому содержанию меди (в %): 5 – 0,2, 6 – 0,5, 7 – 1,0; см. услов. обозн. к рис. 7

разломом. На юго-востоке участка месторождения присутствуют реликтовые поля нижнепалеозойских известняков, которые могли оказывать экранирующее воздействие в период становления Коксайского плутона (рисунки 11, 12).

Околорудные метасоматиты, в составе которых преобладают серицит, хлорит, карбонаты, кварц, пирит, являются продуктами кислотного выщелачивания пород. Они слагают филлизитовую зону МПС, которая по количественному соотношению основных новообразованных минералов может быть разделена на подзоны (см. рис. 12). Ранние высокотемпературные калишпатсодержащие метасоматиты отсутствуют. Периферийная пропилитовая зона проявлена слабо в виде хлоритизации, карбонатизации и пиритизации немногочисленных зёрен роговой обманки во вмещающих гранодиоритах. В целом

зональность месторождения соответствует «гранодиоритовой» модели А. И. Кривцова [15].

Меднорудное тело, представляющее собой ветвящуюся по восстанию зону развития сульфидно-кварцевых прожилков и редких жил (с крутыми и средними углами падения), вкрапленности и гнёзд сульфидов, в первом приближении конформно порфировому интрузиву и его дайкам-апофизам. Геометрически в первом приближении оно соответствует наклонной пластине с ответвлениями и может быть отнесено к *третьему морфологическому типу* МПМ. Основное промышленное значение имеют вкрапленно-прожилковые руды, локализованные в экзоконтактных зонах порфировых даек в основном в изменённых гранодиоритах. В самих дайках и периферийных участках интрузивной рамы степень гидротермальных преобразований существенно

2. Физико-механические свойства пород Au-Mo-Cu-порфирового месторождения Кызата Саукбулакского рудного поля

Исходные породы	Метасоматические зоны и подзоны МПС		Новообразованные минеральные ассоциации	Интенсивность изменения	n	ρ	P <sub>ф</sub>	A
	Зона	Подзона						
1	2	3	4	5	6	7	8	9
Андезидациты (лавы, кластолавы) субвулканическое тело (C <sub>2</sub> m <sub>1</sub> )			Сер-Хл Сер-Хл-Карб Альб-Эп-Карб-Хл-Му-Сер Кв-Му-Карб-Эп-Хл	I	4	<u>2,71–2,76</u> 2,74	<u>0,50–0,81</u> 0,65	<u>0,02–0,27</u> 0,14
			Сер-Карб-Хл Хл-Кв-Сер-Кар	II	2	<u>2,70–2,76</u> 2,73	<u>0,40–1,27</u> 0,84	<u>0,23–0,26</u> 0,25
Андезиты мелкопорфировые (лавы, лавобрекчии) нижней толщи (C <sub>2</sub> m <sub>1</sub> )			Карб-Сер-Хл-гидр. Fe	I	1	2,73	0,41	0,23
			Карб-Сер-Хл-гидр. Fe Хл-Эп-Карб Кв-Сер-Хл-Карб-Каол Сер-Хл-Эп-Карб	II	5	<u>2,70–2,79</u> 2,74	<u>0,78–1,14</u> 0,94	<u>0,14–0,33</u> 0,23
			Карб-Сер-Хл	III	2	<u>2,69–2,79</u> 2,74	<u>1,41–1,76</u> 1,59	<u>0,49–0,61</u> 0,55
Андезиты (D <sub>1</sub> )			Кв-Би-Хл-Сер	II	1	2,79	0,84	0,25
Гравеллиты (C <sub>1</sub> )			Хл-Карб	II	1	2,74	0,5	0,19
Конгломераты (C <sub>1</sub> )			Кв-Хл-Карб	II	1	2,73	0,28	0,20
Доломиты мраморизованные (D <sub>3</sub> )			С редкими прожилками и пятнами Анг и Ги, ед. вкр. Пи	III–IV	12	<u>2,68–2,82</u> 2,76	<u>0,18–0,75</u> 0,45	<u>0,04–0,26</u> 0,15
Известняки мраморизованные (D <sub>3</sub> )			С редкими прожилками Анг, ед. вкр. Пи	III–IV	5	<u>2,69–2,85</u> 2,79	<u>0,23–0,63</u> 0,40	<u>0,09–0,56</u> 0,25
Известковистый песчаник (D <sub>3</sub> )			Анг-Ги	II	1	3,14	1,46	0,40
Песчаник (D <sub>3</sub> )			Каол-Анг-Ги	II	1	2,78	0,36	0,19
Ангидритовый прослой (D <sub>3</sub> )			Сосс-Хл-Серп (с густой вкр. Пи-15–20 %)	II	3	<u>2,85–2,89</u> 2,87	<u>0,23–0,28</u> 0,25	<u>0,14–0,18</u> 0,16
Скарны по известнякам и доломитам (C <sub>2</sub> )			Эп-Пир-Ка-, Кар-Хл-Эп-Акт-Мг; с прожилками и пятнами Анг, Ги, Сер, Хл, Серп, Пи	III–IV	6	<u>2,65–3,00</u> 2,83	<u>0,52–2,30</u> 1,35	<u>0,10–0,57</u> 0,34
Монцит-порфиры гушайского комплекса (C <sub>3</sub> -P)			Му-Сер-Хл-Эп-Пр-Карб	I	9	<u>2,68–2,76</u> 2,71	<u>0,16–0,50</u> 0,32	<u>0,07–0,34</u> 0,15
				II	11	<u>2,65–2,77</u> 2,69	<u>0,24–1,32</u> 0,64	<u>0,13–0,46</u> 0,22
Гранодиориты куюндинского комплекса (C <sub>3</sub> -P <sub>1</sub> )			Сер-Эп-Хл-Карб	III–IV	5	<u>2,64–2,84</u> 2,71	<u>0,48–0,97</u> 0,73	<u>0,21–0,36</u> 0,30
			КПШ	IV	1	2,66	1,19	0,49
Эруптивная брекчия (C <sub>2</sub> )			Сер-Хл-Кв	II	1	2,69	0,36	0,25
Гранодиорит-порфиры алмалыкского комплекса (C <sub>2</sub> )	Биотит-калишпатовая		КПШ/Сер-Хл	I	1	2,71	0,34	0,10
			Би-КПШ/Хл-Эп-Сер Би-КПШ/Кв-Хл-Сер	II	5	<u>2,65–2,70</u> 2,67	<u>0,55–0,81</u> 0,67	<u>0,11–0,44</u> 0,24
			КПШ/Карб-Кв-Хл-Сер КПШ/Хл-Сер КПШ/Сер-Кв	III	3	<u>2,76–2,81</u> 2,79	<u>0,41–0,61</u> 0,50	<u>0,09–0,12</u> 0,14

В	μ	Е	G	K <sub>сж</sub>	θ	НВ	Кпк
10	11	12	13	14	15	16	17
$\frac{0,005-0,025}{0,019}$	$\frac{0,25-0,29}{0,27}$	$\frac{6,58-7,05}{6,78}$	$\frac{2,59-2,81}{2,68}$	$\frac{4,41-5,53}{4,89}$	$\frac{435-449}{440}$	$\frac{148-242}{212}$	$\frac{(-0,99)-(-0,60)}{-0,80}$
$\frac{0,056-0,084}{0,070}$	0,28	$\frac{5,27-6,73}{6,00}$	$\frac{2,06-2,62}{2,34}$	$\frac{3,98-5,18}{4,58}$	$\frac{390-435}{413}$	$\frac{97-108}{103}$	$\frac{(-0,37)-(-0,04)}{-0,21}$
0,007	0,28	7,11	2,78	5,34	450	163	-0,94
$\frac{0,02-0,044}{0,030}$	$\frac{0,20-0,29}{0,25}$	$\frac{6,10-7,46}{6,47}$	$\frac{2,30-2,95}{2,53}$	$\frac{3,97-5,29}{4,58}$	$\frac{425-466}{439}$	$\frac{83-191}{131}$	$\frac{(-0,52)-(-0,19)}{-0,40}$
$\frac{0,050-0,055}{0,053}$	$\frac{0,25-0,28}{0,27}$	$\frac{4,18-5,47}{4,83}$	$\frac{1,63-2,19}{1,91}$	$\frac{3,22-5,47}{4,35}$	$\frac{342-400}{371}$	$\frac{57-158}{108}$	$\frac{0,00-0,14}{0,07}$
0,030	0,29	7,20	2,79	5,72	448	180	-0,61
0,029	0,29	7,12	2,76	5,70	448	146	-0,64
0,011	0,31	7,21	2,74	6,48	449	76	-0,86
$\frac{0,030-0,070}{0,047}$	$\frac{0,30-0,34}{0,32}$	$\frac{5,48-9,16}{7,22}$	$\frac{2,08-3,49}{2,74}$	$\frac{5,02-8,12}{6,61}$	$\frac{392-500}{446}$	$\frac{30-227}{99}$	$\frac{(-1,35)-(-0,70)}{-0,92}$
$\frac{0,01-0,048}{0,031}$	$\frac{0,3-0,36}{0,34}$	$\frac{6,51-9,10}{7,08}$	$\frac{2,40-3,51}{2,66}$	$\frac{5,78-7,97}{7,28}$	$\frac{415-497}{438}$	$\frac{80-206}{144}$	$\frac{(-1,11)-(-0,71)}{-0,86}$
0,04	0,31	9,10	3,48	7,90	475	97	-0,98
0,027	0,25	8,13	3,24	5,49	481	80	-0,68
$\frac{0,030-0,040}{0,033}$	$\frac{0,23-0,32}{0,29}$	$\frac{5,86-9,24}{7,57}$	$\frac{2,22-3,75}{2,96}$	$\frac{5,39-6,66}{5,94}$	$\frac{395-510}{453}$	$\frac{36-111}{62}$	$\frac{(-1,39)-(-0,82)}{-1,03}$
$\frac{0,059-0,09}{0,077}$	$\frac{0,30-0,34}{0,32}$	$\frac{4,83-6,49}{5,65}$	$\frac{1,81-2,47}{2,15}$	$\frac{4,39-5,85}{5,12}$	$\frac{357-429}{391}$	$\frac{45-82}{67}$	$\frac{(-0,58)-(-0,11)}{-0,39}$
$\frac{0,018-0,039}{0,027}$	$\frac{0,24-0,31}{0,26}$	$\frac{6,70-7,97}{7,44}$	$\frac{2,56-3,15}{2,95}$	$\frac{4,87-5,83}{5,22}$	$\frac{437-477}{464}$	$\frac{157-280}{221}$	$\frac{(-1,06)-(-0,60)}{-0,84}$
$\frac{0,020-0,045}{0,029}$	$\frac{0,16-0,27}{0,24}$	$\frac{6,10-7,80}{7,31}$	$\frac{2,43-3,16}{2,95}$	$\frac{3,78-5,70}{4,70}$	$\frac{423-480}{464}$	$\frac{67-275}{205}$	$\frac{(-0,71)-(-0,21)}{-0,45}$
$\frac{0,020-0,040}{0,032}$	$\frac{0,22-0,27}{0,25}$	$\frac{6,18-8,57}{7,14}$	$\frac{2,49-3,53}{2,85}$	$\frac{4,01-5,16}{4,84}$	$\frac{427-495}{455}$	$\frac{166-238}{200}$	$\frac{(-0,61)-(-0,11)}{-0,35}$
0,050	0,32	5,46	2,07	4,95	394	229	-0,17
0,056	0,28	7,05	2,75	5,38	451	199	-0,54
0,019	0,25	7,65	3,06	5,10	472	236	-0,91
$\frac{0,020-0,040}{0,028}$	$\frac{0,24-0,31}{0,28}$	$\frac{5,98-7,06}{6,55}$	$\frac{2,31-2,79}{2,57}$	$\frac{4,19-5,94}{4,98}$	$\frac{414-451}{435}$	$\frac{159-251}{205}$	$\frac{(-0,62)-(-0,37)}{-0,49}$
$\frac{0,03-0,04}{0,035}$	$\frac{0,24-0,32}{0,27}$	$\frac{6,61-7,29}{7,02}$	$\frac{2,51-2,93}{2,78}$	$\frac{4,54-6,06}{5,10}$	$\frac{424-458}{444}$	$\frac{174-255}{213}$	$\frac{(-0,84)-(-0,76)}{-0,81}$

1	2	3	4	5	6	7	8	9
Гранодиорит-порфиры алмалыкского комплекса (C <sub>2</sub> )	Филлизитовая	Внешняя	Сер-Хл Сер-Му-Кв-Карб Сер-Карб-Эп-Хл Хл-Сер-Карб	I	7	$\frac{2,63-3,05}{2,77}$	$\frac{0,26-0,55}{0,42}$	$\frac{0,08-0,27}{0,13}$
			Хл-Эп-Сер Хл-Сер-Карб	II	4	$\frac{2,66-2,67}{2,67}$	$\frac{0,34-0,55}{0,45}$	$\frac{0,13-0,31}{0,20}$
			Карб-Хл-Сер Карб-Эп-Хл-Сер-сосс Кв-Сер-Хл Му-Хл-Карб-Сер	III	7	$\frac{2,61-2,82}{2,67}$	$\frac{0,60-2,61}{1,03}$	$\frac{0,15-0,67}{0,36}$
		Внутренняя	Кв-Карб Му-Сер Карб-Эп-Хл-Сер Карб-Хл-Кв-Сер Кв-Хл-Му-Сер	II	5	$\frac{2,68-2,83}{2,74}$	$\frac{0,38-0,86}{0,58}$	$\frac{0,14-0,33}{0,21}$
			Кв-Сер	III	4	$\frac{2,69-2,83}{2,77}$	$\frac{0,49-0,86}{0,69}$	$\frac{0,11-0,24}{0,19}$
			Сер-Кв	IV	5	$\frac{2,62-3,01}{2,82}$	$\frac{0,53-0,70}{0,63}$	$\frac{0,21-0,42}{0,27}$
Сиенито-диориты (C <sub>2</sub> )	Филлизитовая	Внешняя	Сер-Хл Хл-Сер (Кв)-Хл-Сер Кв-Сер-Карб-Эп	I	6	$\frac{2,68-2,80}{2,75}$	$\frac{0,19-0,55}{0,41}$	$\frac{0,07-0,18}{0,13}$
Аляскиты мелко- и средне-зернистые, аплитовидные (D-S)	Филлизитовая	Внешняя	Сер-Карб	II	9	$\frac{2,55-2,60}{2,58}$	$\frac{0,74-1,21}{0,93}$	$\frac{0,12-0,71}{0,41}$
			Сер-Карб Кв-Карб-Сер Карб-Кв-Сер	III	3	$\frac{2,61-2,65}{2,64}$	$\frac{0,75-1,37}{1,16}$	$\frac{0,38-0,39}{0,38}$
			Сер-Кв	IV	2	$\frac{2,69-2,70}{2,70}$	$\frac{0,62-0,85}{0,74}$	$\frac{0,28-0,39}{0,34}$

*Примечание.* Практически все разности метасоматитов в том или ином количестве содержат вкрапленность пирита; кроме него отмечаются магнетит, молибденит, халькопирит и др. рудные минералы. Степень преобразования исходных пород: I – слабая, новообразованных ассоциаций перечислены в порядке увеличения частоты встречаемости): Акт – актинолит, Алб – альбит, Амф – полевои шпат, Му – мусковит, Пир – пироксен, Пр – пренит, Сер – серицит, Серп – серпентин, Сосс – соссорит, Хл – хлорит, Эп – КПШ/Хл-Эп-Сер, КПШ/Сер-Кв – новообразованные минеральные ассоциации биотит-калишпатовой зоны с наложенными в знаменателе – среднее значение);  $\rho$  – плотность (г/см<sup>3</sup>);  $P_{эф}$  – эффективная пористость (%); А – условно-мгновенное насыщение объёмного сжатия;  $\theta$  – температура Дебая (°К); НВ – твёрдость по Бринеллю (кГс/мм<sup>2</sup>); Кпк – комплексный петрофизический

ниже; здесь развиты убогие вкрапленные руды. Рудные минералы в прожилках и вкрапленности представлены пиритом, халькопиритом, магнетитом, более редким молибденитом; эпизодически встречаются борнит, галенит, сфалерит, халькозин, ковеллин, блёклые руды, арсенопирит, пирротин, марказит, самородные золото и висмут [19, 21]. Выделены пять рудообразующих минеральных ассоциаций (рис. 13). Основным жильным минералом в них является кварц, в пострудных ассоциациях – кальцит и более редкие доломит, ангидрит и барит.

Физико-механические свойства практически всех типов пород месторождения (табл. 3) свидетельствуют о склонности к хрупким деформациям (*упругий* тип сред). Для них характерны средние показатели фильтрации, упругости и твёрдости, существенным

образом изменяющиеся по мере роста степени гидротермальной проработки. Значения коэффициента Пуассона ( $\mu$ ) варьируют от 0,20 до 0,28 и лишь для интенсивно серицитизированных разностей гранодиорит-порфиров, гранодиоритов и древних гранитов достигают 0,30–0,33. Для малоизменённых гранитоидов значения Кпк от –0,76 до –0,69, для средне- и сильно преобразованных – от –0,59 до +0,17. Штокверковое рудное тело, оконтуренное по бортовому содержанию Си 0,3 %, в первом приближении отражается полем значений Кпк > –0,5 (рис. 14).

Уплощённая морфология рудоносного порфирового интрузива, ветвящегося по восстанию на серию даек-апофиз, и хрупкая деформационная природа вмещающих гранодиоритов выразилась в ряде специфических черт рудного тела Коксайского

Окончание таблицы 2

10	11	12	13	14	15	16	17
$\frac{0,011-0,053}{0,026}$	$\frac{0,16-0,29}{0,24}$	$\frac{6,87-10,27}{7,91}$	$\frac{2,7-3,98}{3,20}$	$\frac{3,91-8,11}{5,16}$	$\frac{447-514}{475}$	$\frac{104-286}{223}$	$\frac{(-1,03)-(-0,60)}{-0,86}$
$\frac{0,020-0,069}{0,038}$	$\frac{0,26-0,28}{0,27}$	$\frac{6,75-7,01}{6,75}$	$\frac{2,46-2,78}{2,66}$	$\frac{4,86-5,15}{4,95}$	$\frac{427-453}{443}$	$\frac{191-262}{221}$	$\frac{(-0,64)-(-0,57)}{-0,60}$
$\frac{0,020-0,060}{0,041}$	$\frac{0,25-0,29}{0,27}$	$\frac{4,85-7,12}{6,06}$	$\frac{1,87-2,85}{2,38}$	$\frac{4,29-5,05}{4,46}$	$\frac{365-459}{418}$	$\frac{41-214}{153}$	$\frac{(-0,48)-(-0,30)}{-0,18}$
$\frac{0,027-0,039}{0,033}$	$\frac{0,21-0,29}{0,25}$	$\frac{6,01-7,39}{6,62}$	$\frac{2,34-3,04}{2,64}$	$\frac{3,97-5,09}{4,50}$	$\frac{413-464}{436}$	$\frac{116-223}{155}$	$\frac{(-0,74)-(-0,29)}{-0,50}$
$\frac{0,030-0,087}{0,052}$	$\frac{0,18-0,33}{0,25}$	$\frac{5,29-7,36}{6,37}$	$\frac{1,99-3,12}{2,57}$	$\frac{3,83-5,19}{4,40}$	$\frac{378-465}{427}$	$\frac{85-225}{170}$	$\frac{(-0,56)-0,23}{-0,42}$
$\frac{0,020-0,050}{0,036}$	$\frac{0,20-0,29}{0,25}$	$\frac{5,47-8,87}{6,84}$	$\frac{2,16-3,70}{2,75}$	$\frac{3,87-4,93}{4,52}$	$\frac{396-493}{437}$	$\frac{47-275}{151}$	$\frac{(-0,81)-(-0,41)}{-0,65}$
$\frac{0,018-0,056}{0,031}$	$\frac{0,26-0,29}{0,28}$	$\frac{7,08-7,60}{7,36}$	$\frac{2,75-3,00}{2,88}$	$\frac{5,16-5,74}{5,53}$	$\frac{448-468}{457}$	$\frac{163-236}{205}$	$\frac{(-0,96)-(-0,53)}{-0,79}$
$\frac{0,030-0,060}{0,042}$	$\frac{0,21-0,28}{0,25}$	$\frac{5,40-6,97}{6,12}$	$\frac{2,06-2,89}{2,46}$	$\frac{3,42-4,73}{4,07}$	$\frac{394-461}{427}$	$\frac{218-270}{251}$	$\frac{(-0,11)-(-0,34)}{0,05}$
$\frac{0,020-0,060}{0,047}$	$\frac{0,21-0,25}{0,23}$	$\frac{5,05-7,13}{6,40}$	$\frac{2,02-2,90}{2,60}$	$\frac{3,36-4,41}{3,93}$	$\frac{386-462}{436}$	$\frac{214-297}{242}$	$\frac{(-0,03)-(-0,17)}{0,06}$
$\frac{0,020-0,020}{0,020}$	$\frac{0,19-0,23}{0,21}$	$\frac{6,76-7,31}{7,04}$	$\frac{2,74-3,66}{3,20}$	$\frac{2,44-4,20}{3,32}$	$\frac{447-506}{477}$	$\frac{69-148}{109}$	$\frac{(-0,14)-(-0,43)}{0,15}$

в филлизитовой и биотит-калишпатовой зонах МПС (в хлоритизированных темноцветных минералах и кварцевых прожилках) II – средняя, III – интенсивная, IV – весьма интенсивная (полное замещение). Основные минералы метасоматитов (в названиях амфибол, Анг – ангидрит, Би – биотит, Ги – гипс, Ка – кальцит, Каол – каолин, Кв – кварц, Кар – карбонаты, КПШ – калиевый эпидот, Гидр. Fe – гидроокислы железа. КПШ/Сер-Хл, КПШ/Хл-Сер, КПШ/Карб-Кв-Хл-Сер, Би-КПШ/Кв-Хл-Сер, Би-ассоциациями более поздней филлизитовой зоны. Физико-механические параметры (в числителе – интервал колебаний значений, (%), В – постоянная насыщения (час<sup>-1</sup>),  $\mu$  – коэффициент Пуассона; модули упругости ( $\times 10^5$  кгс/см<sup>2</sup>): Е – Юнга, G – сдвига,  $K_{сж}$  – коэффициент; n – количество проб.

месторождения. На поверхности и верхних горизонтах оно представляет собой серию сближенных линейных зон, сливающихся на глубине в более мощные пластинообразные тела (см. рисунки 11, 12). Штокверковая минерализация сосредоточена в узких эндо-экзоконтактовых зонах порфировых даек, из-за чего наблюдаются совмещение (телескопирование) в пространстве разновозрастных продуктов минералообразования и, соответственно, повышенная густота рудных прожилков (объемы прожилковой массы главной продуктивной минеральной ассоциации – до 12–15 %, для МПМ Алмалыкского РП – до 8–10 %) и более высокие средние содержания Си и Мо в рудах. Тем не менее для Коксайского штокверка, как и для объектов Алмалыка, установлена центробежная тенденция развития во времени – от

контактов порфировых даек в благоприятные для хрупких деформаций гранодиориты. Ареал пострудных карбонатных и более редких сульфатных прожилков охватывает практически все породы месторождения, включая наиболее поздние (см. рис. 13).

**Актогайское РП** с Мо-Си-порфировыми месторождениями Актогай и Айдарлы (с запасами Си около 6 млн т (при среднем содержании 0,39 и 0,38 %) каждое и Мо – 115 тыс. т (0,008 %) и 110 тыс. т (0,010 %), KAZ Minerals PLC, 2017 г.) и рудопроявлениями Кзылкия, Западный, Промежуточный и Восточный расположено в **Актогайском РР** Баканасской МЗ Балхашско-Илийской провинции (ВПП). Крупная РМС, эквивалентная РР, охватывает Колдарский полихронный интрузивный массив, занимающий ядерную часть горстообразного магматогенного

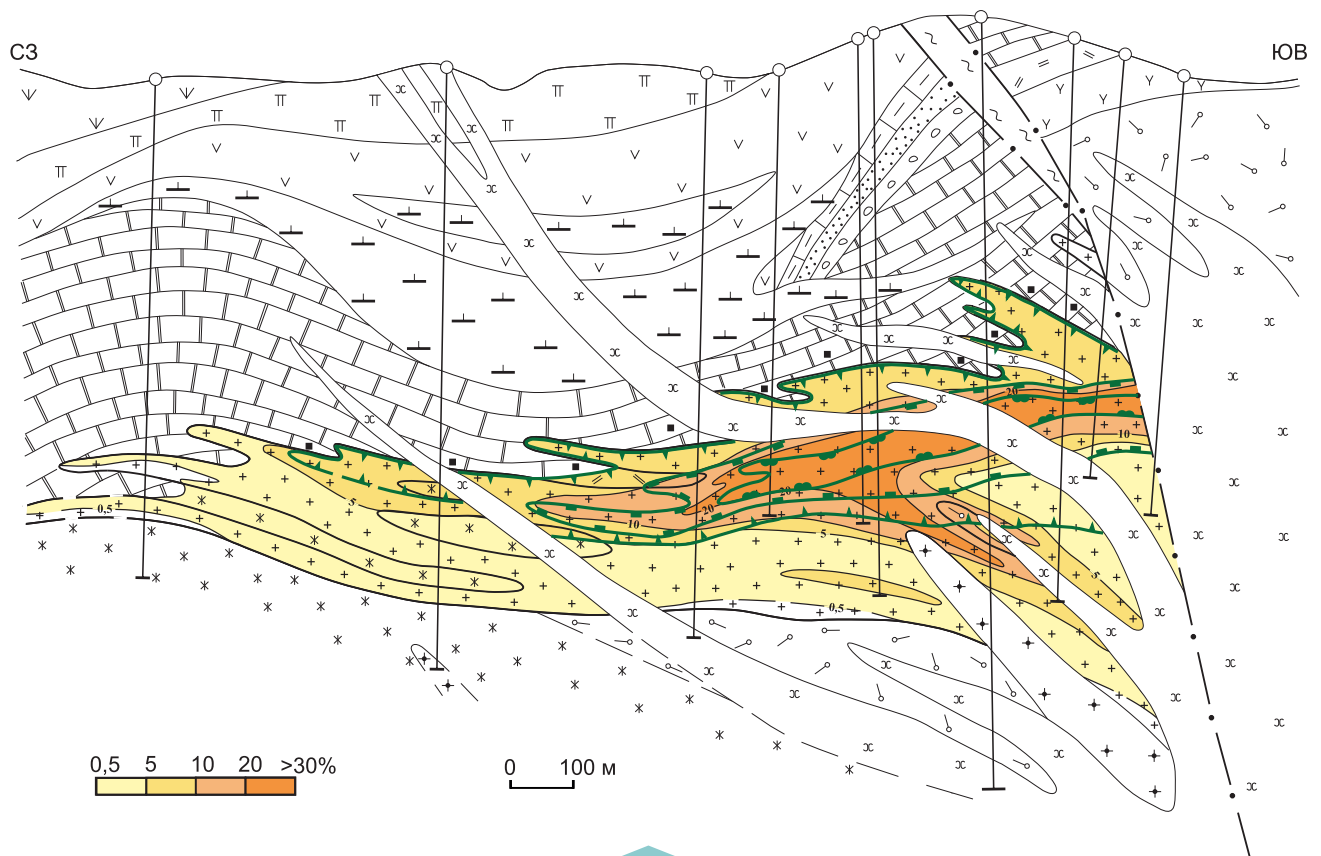


Рис. 9. Рудоносный штокверк месторождения Кызата:

распределение объёмов рудных прожилков (в % от объёма вмещающих пород) в разрезе по профилю VI; см. услов. обозн. к рис. 7

поднятия в узле пересечения глубинных разломов, и вмещающие вулканогенные породы. Плутон сложен гранитоидами двух формаций К-На профиля – габбро-диорит-гранодиоритовой ( $C_{2-3}$ ) и лейкогранитной ( $C_3$ ). Первая из них вместе с базальт-андезит-риолитовой формацией составляет продуктивную на медно-порфиновые руды вулcano-плутоническую ассоциацию раннего этапа формирования пояса [19].

Вытянутый в субширотном направлении Колдарский массив имеет лакколитообразную морфологию, площадь около  $75 \text{ км}^2$  на дневной поверхности и свыше  $200 \text{ км}^2$  на глубине; залегает субсогласно в комагматических вулканитах керегетасской свиты ( $C_{2-3}kg_1$ ) и перекрыт трансгрессивно налегающими вулканогенно-осадочными отложениями колдарской свиты ( $C_3-P_1kl$ ). Фанеритовые фазы плутона представлены непрерывным рядом габбро – габбро-диабазы – габбро-диориты – диориты – кварцевые диориты – гранодиориты, порфировая фаза – дайками, дайкоподобными и трубчатыми телами гранодиорит-порфиров (рудноносных) и эруптивных брекчий (с кварц-биотитовым и серицит-турмалиновым цементом). Массив рассечён поздними дайками плагио-

гранит-порфиров, диоритовых порфиров, аплитов, микродиоритов, лампрофиров, диабазов [14, 20, 23].

Месторождения и рудопроявления РП сопряжены со штоками гранодиорит-порфиров завершающей фазы рудоносной плутогенной формации. Эти штоки, являющиеся выступами-апофизами «материнского» многофазного интрузива (промежуточного магматического очага) и проводниками тепла и металлоносных флюидов, «достигли» при подъёме расплава различных гипсометрических уровней в верхней части ЗК, из-за чего ассоциирующие с ними зоны гидротермальных изменений и Mo-Cu штокверковой минерализации к настоящему времени в различной степени эродированы. Наиболее глубокий уровень эрозионного среза на Кзылкие, средний – на Актогае, наименьший – на Айдарлы и на не выходящих на дневную поверхность рудопроявлениях. Фактически Актогайское РП включает несколько отдельных гидротермальных рудообразующих систем, «стержневыми» элементами которых являются штоки гранодиорит-порфиров.

**Месторождение Актогай**, разведанное Л. У. Кыдырбековым, А. М. Красниковым, Л. В. Мельниковой,

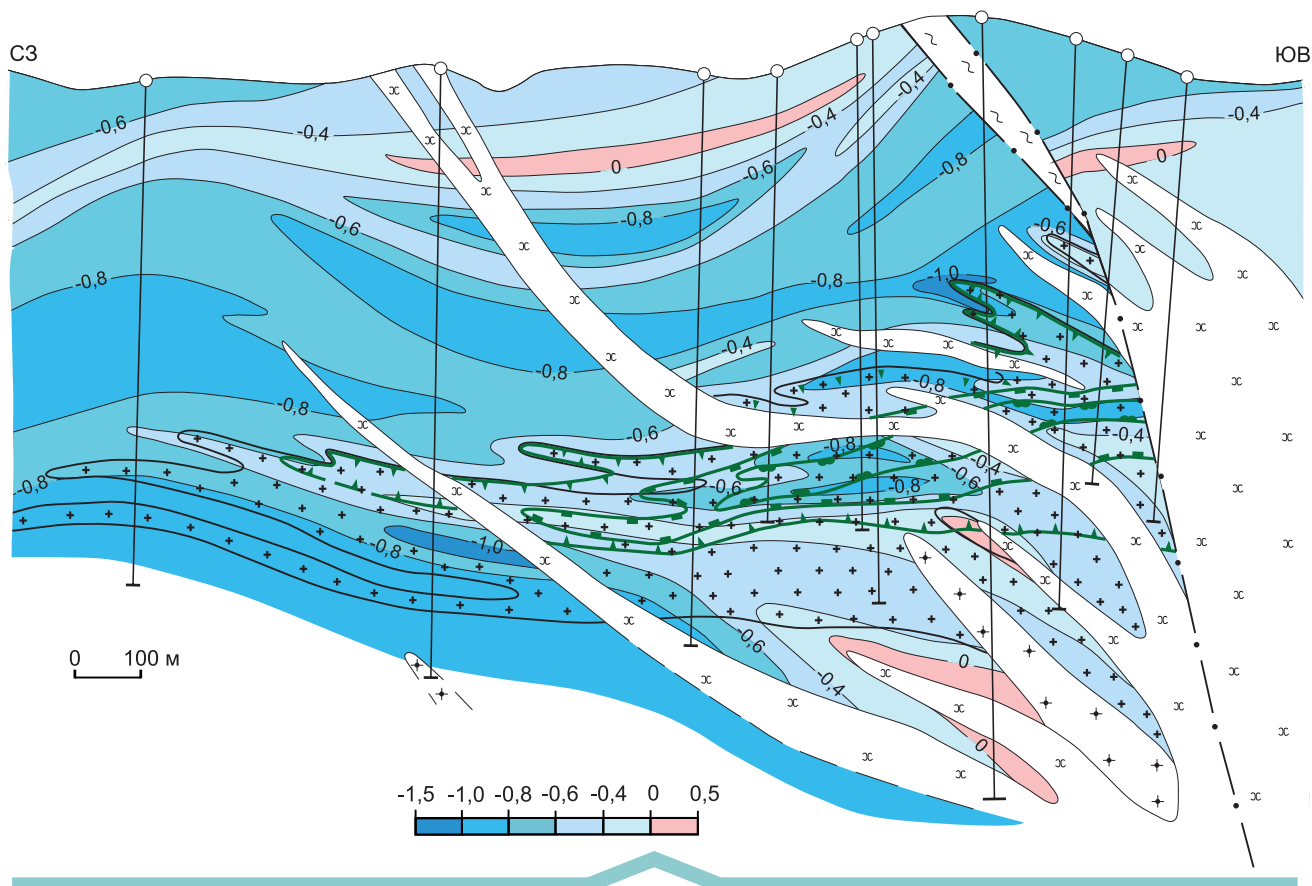


Рис. 10. Месторождение Кызата. Разрез по профилю VI в изолиниях комплексного петрофизического коэффициента (Кпк): см. услов. обозн. к рис. 7

А. И. Полетаевым, Ю. А. Сергийко и др., приурочено к провису кровли Колдарского массива, сложенного ороговикованными и гидротермально изменёнными породами керегетаской свиты – андезитами, андезидацитами и их туфами (с маломощными прослоями туфопесчаников и туффитов), а также лавами, лавобрекчиями и туфами риолитов и риодацитов. Вулканогенная толща этого крупного ксенолита имеет северо-западное простирание при крутом южном падении. Северный, восточный и юго-западный фланги месторождения сложены среднезернистыми диоритами и габбро-диоритами основной фазы массива, прорванными средне- и неравномерно зернистыми кварцевыми диоритами и гранодиоритами. Более поздние порфировые фазы плутона, представленные вытянутыми в северо-западном направлении крутопадающими штоками и дайками порфировидных гранодиоритов и рудоносных гранодиорит-порфиров, а также брекчиевыми телами, развиты как в центральной, так и в западной частях площади (рисунки 15, 16).

Практически все типы породы, за исключением поздних диабазовых даек, интенсивно изменены. К

глубинным частям гранодиорит-порфировых штоков приурочены «кварцевые ядра» – монокварцевые метасоматиты, которые в направлении к внешним частям МПС сменяются биотит-калишпатовыми и биотитовыми<sup>2</sup>, далее серицитсодержащими и пропилитовыми (эпидот-актинолитовыми и альбит хлорит-прениновыми с карбонатами) с рассеянной вкрапленностью пирита («пиритовый ореол»), что соответствует «гранодиоритовой» модели зональности МПС (рисунки 15, 17). Ранние К-кремниевые метасоматиты (с биотитом и КПШ), вмещающие основной объём промышленных руд, частично «уничтожены» более поздним кислотным выщелачиванием. Они в том или ином количестве содержат серицит, хлорит, кварц, карбонаты, пирит наложенной филлизитовой зоны, в которой, в свою очередь, отмечаются «реликтовые» биотит и калишпат. По количественному соотношению основных новообразованных

<sup>2</sup> На глубоких горизонтах месторождения биотит практически полностью замещён хлоритом, эпидотом, пренином, серицитом, карбонатами, что послужило основанием для выделения некоторыми исследователями «внутренней» пропилитовой зоны.

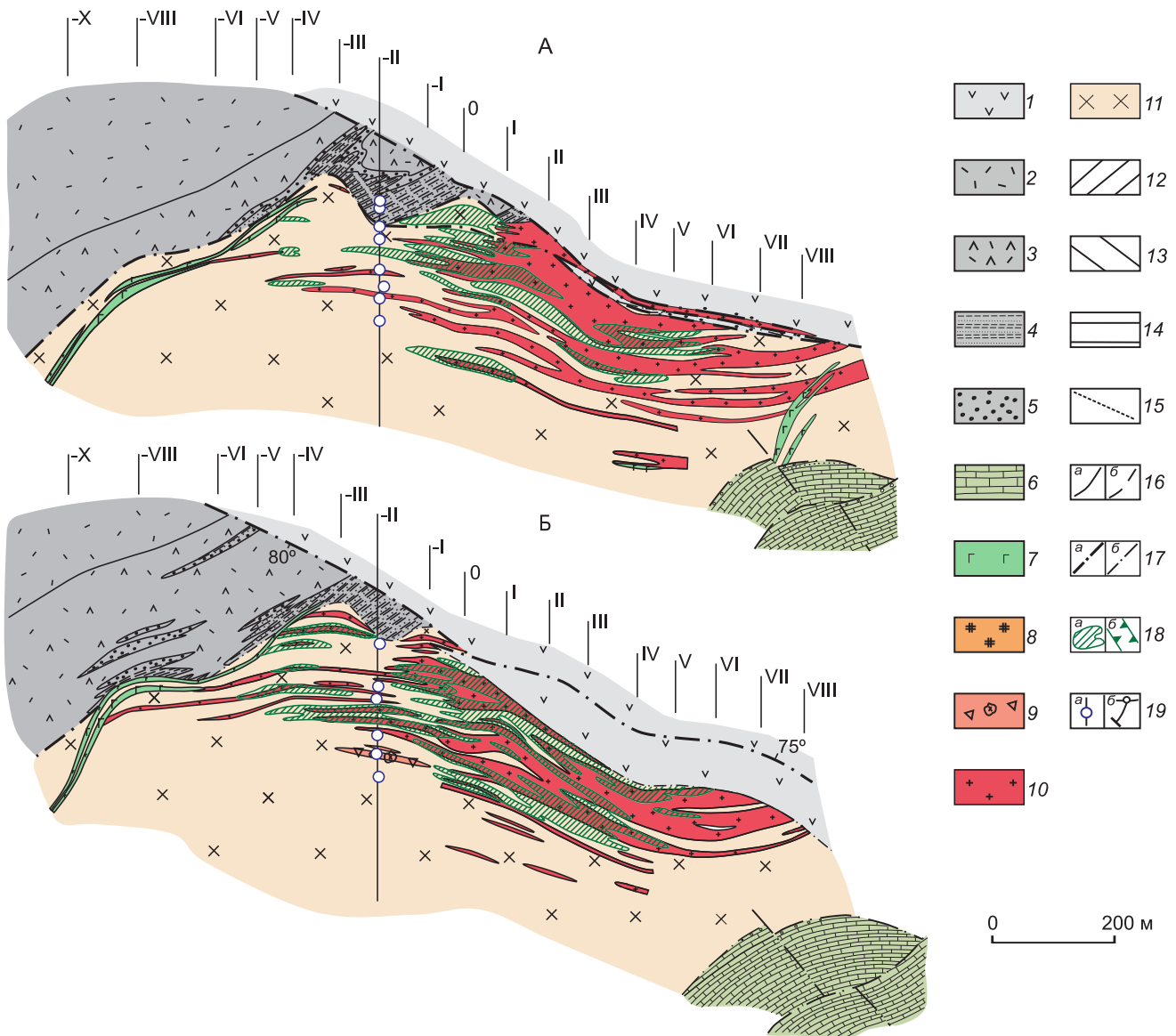


Рис. 11. Коксайское Мо-Си-порфировое месторождение. Геологические планы горизонтов + 1235 м (А) и + 1100 м (Б) (В. С. Звездов, Т. С. Путилина, В. М. Шепелев, 1978 г.):

1 – алтынэмельская свита ( $C_{1,3-n}$ ): андезитовые и андезит-дацитовые лавы, туфы с мелкими линзами туфогенно-осадочных пород; 2–5 – турнейский ярус – нижневезейский подъярус ( $C_1 t-v_1$ ): 2 – риолиты, 3 – дациты, 4 – песчаники, 5 – конгломераты; 6 – известняки с прослоями песчаников и базальными конгломератами в основании толщи ( $S_1$ ), 7–11 – интрузивные породы: 7 – дайки габбро-диабазов (Р), 8 – мелко-среднезернистые граниты ( $C_2$ ), 9–11 – рудоносный коксайский магматический комплекс ( $C_{1-2}$ ): 9 – брекчиевые тела, 10 – дайки гранодиорит-порфиров, плагиогранит-порфиров, 11 – гранодиориты; 12–15 – подзоны филлизитовой зоны (на разрезе по профилю II): 12 – кварц-серицитовая, 13 – кварц-хлорит-серицитовая и серицит-хлоритовая, 14 – мусковит-хлорит-серицитовая, 15 – границы подзон; 16 – контакты пород: установленные (а) и предполагаемые (б); 17 – разломы: а – Коксайский надвиг, б – второстепенные; 18 – контур молибдено-медной минерализации по бортовому содержанию Си 0,3 %: на планах (а), на разрезе по профилю II (б); 19 – положение разведочных скважин: на планах (а), на разрезе по профилю II (б)

минералов метасоматические зоны могут быть разделены на подзоны (табл. 4).

Медно-порфировый штокверк (система сульфидно-кварцевых прожилков, жил и вкрапленности сульфидов между ними) охватывает эндо-эзоконтакто-

вые зоны порфировых интрузивов. Геометрически рудное тело месторождения, отнесённое к *первому морфологическому типу*, представляет собой опрокинутый пологий толстостенный усечённый конус с неровными («коронообразными») нижними

ограничениями; в плане оно имеет форму незамкнутого неправильного кольца, южная часть которого значительно шире, чем северная (см. рисунки 15, 16). Основные запасы месторождения сосредоточены в ксенолите изменённых вулканитов с «частичным выходом» в интрузивные породы на средних и глубоких горизонтах месторождения. Главные компоненты руд – Cu (0,2–1,0 %) и Mo (0,001–0,04 %), попутные – Au (до десятых долей г/т), Ag и Se (до первых г/т). Главные рудные минералы – пирит, халькопирит, молибденит, магнетит; второстепенные – борнит, халькозин, сфалерит, галенит, пирротин, гематит, арсенопирит и др. В зоне окисления развиты гидроокислы железа, малахит, азурит, хризоколла. Основной минерал жильного выполнения – кварц; второстепенные – КПШ, альбит, хлорит, эпидот, пренит, карбонаты, цеолиты. Преобладающие текстуры руд – вкрапленные, прожилково-вкрапленные, редкогнездово-брекчиевидные [16, 19, 20].

Зональность рудоносного штокверка определяется сменой (от его внутренних частей к внешним) кварц-магнетитовой и кварц-молибденит-пиритовой ассоциаций ранней стадии рудоотложения главной продуктивной кварц-молибденит-борнит-халькопиритовой средней (в биотит-калишпатовой зоне) и далее кварц-пирит-халькопиритовой и кварц-халькопиритовой (с пиритом, халькозином, гематитом) поздней стадии (в филлизитовой зоне). Кварц-полисульфидная ассоциация завершающей стадии проявлена фрагментарно на флангах штокверка. Отмеченная зональность в целом подобна выявленной на месторождениях Алмалыкского и Коксайского рудных полей и не противоречит установленной для них центробежной тенденции наращивания штокверков.

Густота рудных прожилков и более редких жил в Актогайском штокверке, имеющих в основном крутые и средние углы падения, сопоставима с установленной на упомянутых объектах, но содержания Cu и попутных компонентов в рудах более низкие. В площади рудного тела на дневной поверхности, равной 3,10 км<sup>2</sup> (при борт. сод. Cu 0,2 %), площадь РТ с содержанием Cu > 0,5 % занимает не более 5 % (см. рис. 15), а с содержанием > 0,7 % – 1,5 %. В разрезе 25, рассекающем наиболее «обогащённую» часть штокверка (см. рис. 16), на долю руд с содержанием Cu > 0,5 % приходится около 40 % площади РТ, равной 0,25 км<sup>2</sup> (по борт. сод. Cu 0,2 %). Для сравнения в разрезе III месторождения Дальнее Алмалыкское РП (см. рис. 2) сравнительно богатые руды (> 0,7 %) «занимают» около 65 % от площади РТ в 0,93 км<sup>2</sup> (по борт. сод. Cu 0,4 %). В разрезе IV месторождения Кызата доля таких руд в РТ (по борт. сод. Cu 0,2 %) с содержанием Cu > 0,5–40 %, а с Cu > 1–20 % (см. рис. 7). Бедные руды характерны и для других Мо-Cu-порфировых

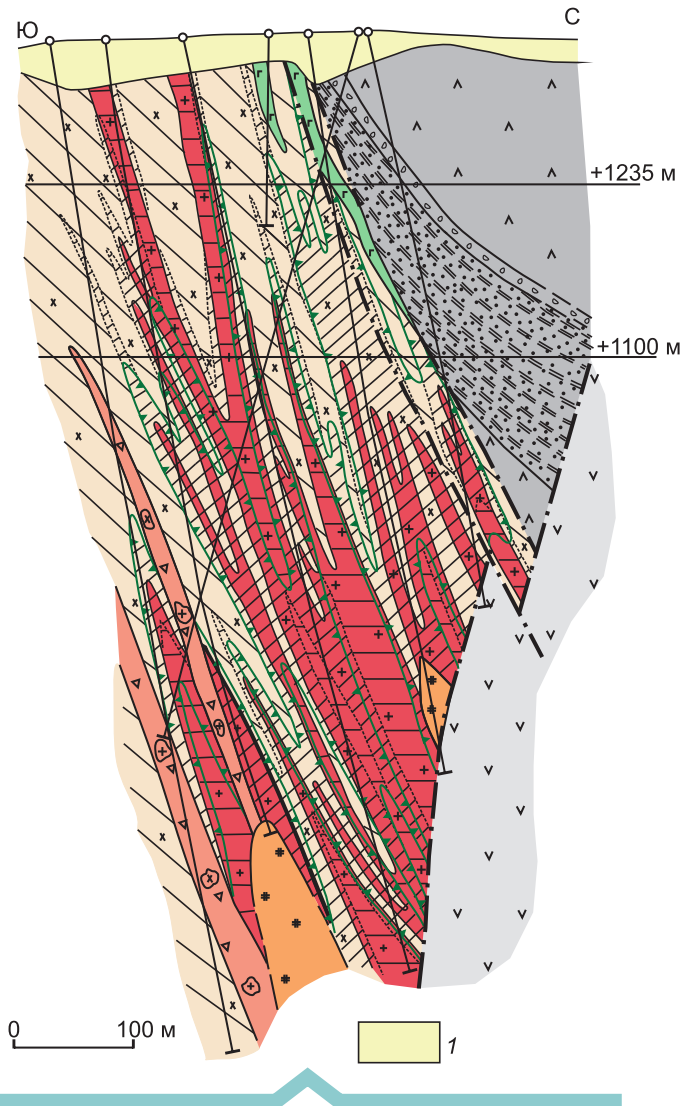


Рис. 12. Коксайское Мо-Cu-порфировое месторождение. Геологический разрез по профилю II:

1 – четвертичные рыхлые отложения; см. услов. обозн. к рис. 11

объектов Актогайского РП – месторождения Айдарлы и всех рудопроявлений. Одной из причин этого обстоятельства, кроме рудоносного потенциала магматического очага («материнского» плутона) и наличия нескольких порфировых штоков – «проводников» металлоносных флюидов (гигантские МПМ, отличающиеся высокосортными рудами, обычно сопряжены с одним крупным порфировым интрузивом [29]), могли быть петрофизические характеристики среды, в достаточной мере не способствовавшие рудо-концентрации.

Наименее изменённые разности интрузивных пород месторождения Актогай (диориты, кварцевые диориты, гранодиориты, гранодиорит-порфириры) обладают сопоставимыми с алмалыкскими МПМ

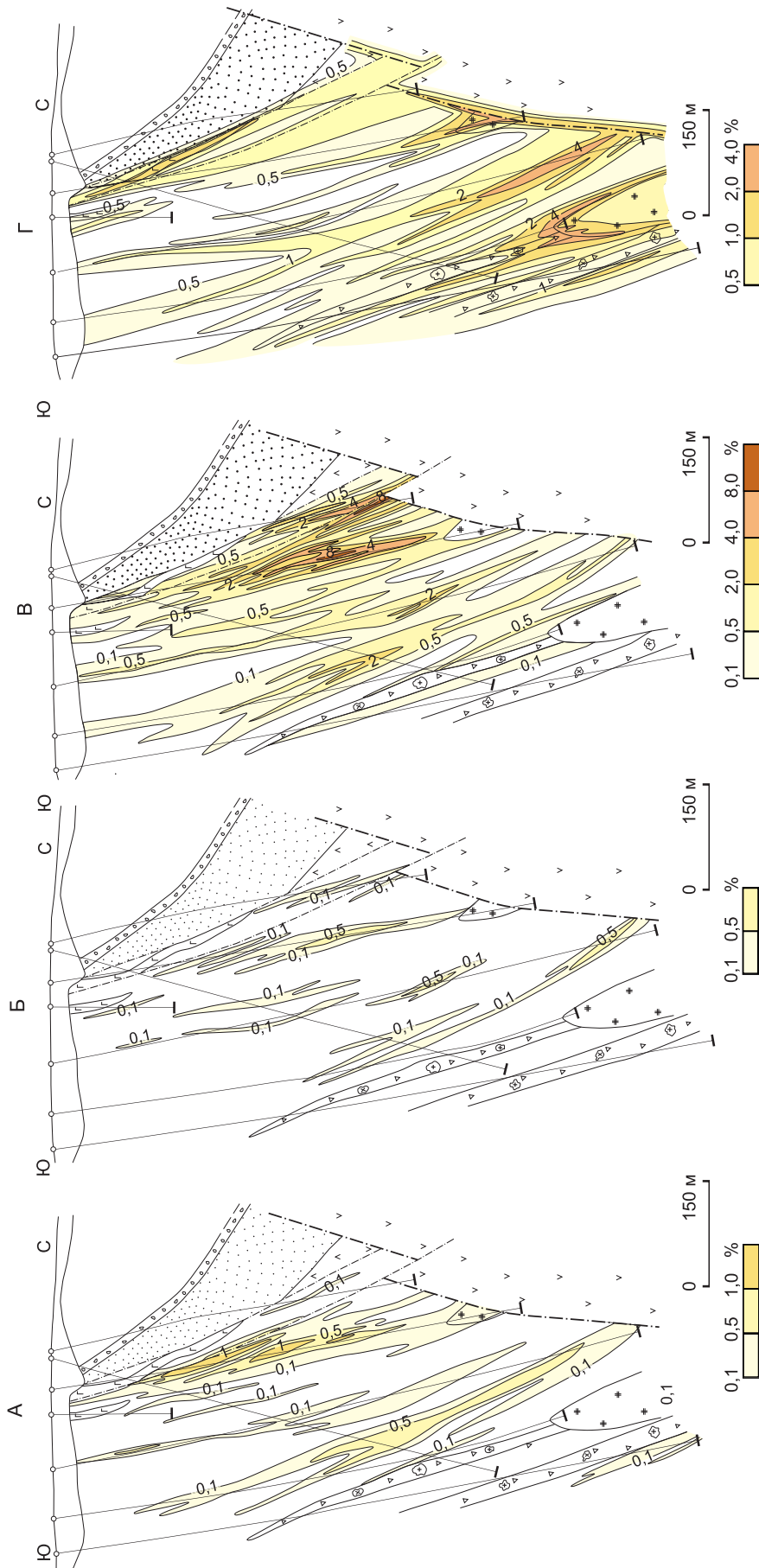


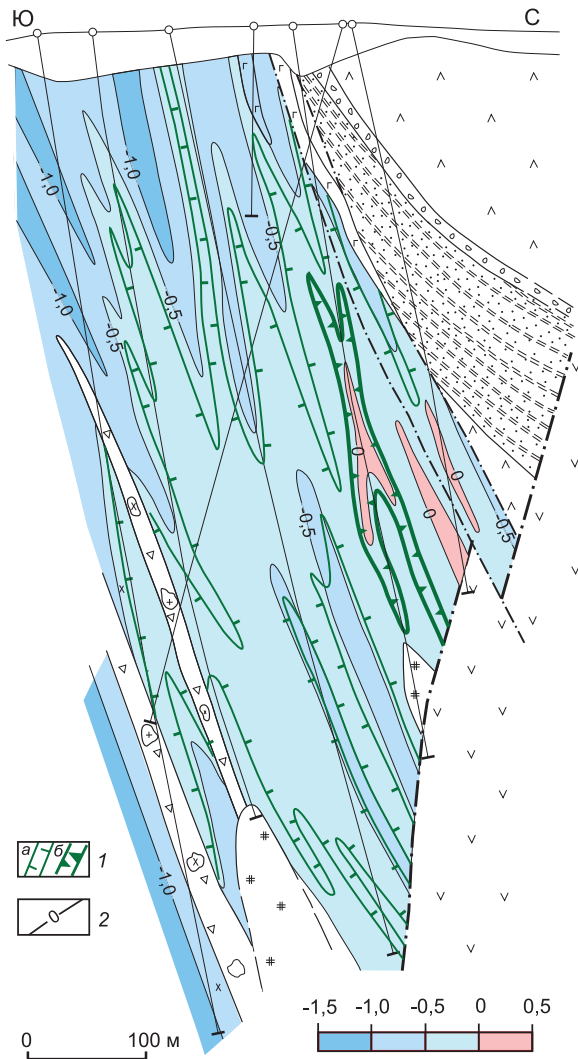
Рис. 13. Строение штокерка Коксайского месторождения:

распределение прожилков разновозрастных минеральных ассоциаций в разрезе по профилю II (в изолиниях объёма, занимаемых ими в минерализованных породах, %): А – кварц-молибденитовой, кварц-магнетитовой, кварц-магнетит-пиритовой; Б-В – основных рудообразующих: Б – кварц-молибденит-халькопирит-пиритовой, В – главной продуктивной кварц-борнит-халькопирит-пиритовой; Г – пострудных с карбонатами, ангидритом, баритом; см. услов. обозн. к рис. 11

3. Физико-механические свойства пород Коксаиского Mo-Cu-порфирового месторождения

Исходные породы	Метасоматические зоны и подзоны МПС		Интенсивность изменения	n	ρ	П <sub>эф</sub>	А	В	μ	Е	G	K <sub>ск</sub>	НВ	Клк
	Зона	Подзона												
Мелко- и среднезернистые граниты (С <sub>2</sub> )	Пострудные гидротермальные преобразования		II	3	2,68	1,17	0,32	0,100	0,24	6,18	2,48	4,02	212	-0,01
			III	2	2,71	2,54	1,06	0,174	0,33	3,70	1,39	3,65	46	0,61
			III	2	2,76	2,02	0,83	0,259	0,20	4,84	2,00	2,74	122	0,51
			IV	2	2,67	1,04	0,42	0,197	0,21	6,11	2,52	3,53	103	-0,08
Эруптивные брекчи (С <sub>1-2</sub> )			III	3	2,72	0,55	0,22	0,032	0,23	7,21	2,91	4,61	181	-0,86
			I	4	2,65	0,73	0,37	0,041	0,22	7,79	2,76	4,17	289	-0,37
Гранодиорит-порфиры, плагиогранит-порфиры (С <sub>1-2</sub> )	МХС		II	2	2,67	0,75	0,25	0,134	0,23	7,17	2,89	4,58	329	-0,20
			III	3	2,65	0,66	0,24	0,025	0,24	6,97	2,79	4,68	259	-0,71
			I	3	2,65	0,52	0,10	0,062	0,24	7,00	2,79	4,49	207	-0,76
			II	7	2,64	0,93	0,18	0,053	0,23	6,59	2,66	4,23	191	-0,56
			III	2	2,68	1,98	0,46	0,083	0,23	5,47	2,21	4,49	50	-0,18
	КХС		III	3	2,65	0,98	0,19	0,059	0,23	6,47	2,61	4,15	165	-0,51
			III	3	2,72	1,51	0,38	0,105	0,23	5,34	2,16	3,40	66	-0,20
			II	3	2,72	1,05	0,24	0,082	0,27	6,68	2,22	4,22	168	-0,25
			III	2	2,63	2,83	0,72	0,082	0,24	4,45	1,79	2,85	99	0,26
			III	2	2,73	2,50	0,50	0,079	0,29	4,25	1,63	3,48	57	0,11
Филлизитовая		III	2	2,72	1,36	0,35	0,046	0,26	4,98	1,96	3,59	37	-0,45	
		IV	2	2,74	0,55	0,15	0,111	0,25	6,41	2,55	4,37	126	-0,58	
		I	4	2,70	0,75	0,20	0,048	0,25	6,76	2,69	4,63	172	-0,69	
		II	2	2,68	0,59	0,21	0,066	0,25	6,78	2,72	4,46	197	-0,59	
		III	2	2,71	2,19	0,71	0,188	0,27	4,92	1,93	3,58	21	0,17	
Гранодиориты (С <sub>1-2</sub> )	КХС		III	2	2,73	0,87	0,31	0,139	0,28	5,69	2,21	4,36	106	-0,22
			III	2	2,74	0,65	0,09	0,063	0,25	6,45	2,56	4,45	123	-0,80
			III	4	2,74	1,02	0,33	0,073	0,23	6,15	2,49	3,83	90	-0,47
Крупнозернистые граниты (О <sub>3</sub> -S <sub>1</sub> )	КХС		IV	2	2,64	0,67	0,18	0,037	0,21	7,12	2,93	4,14	279	-0,59
			I	2	2,64	0,72	0,29	0,121	0,23	6,66	2,70	4,18	249	-0,15
			II	2	2,68	0,68	0,20	0,085	0,26	6,46	2,57	4,44	207	-0,40
			III	3	2,68	1,55	0,75	0,136	0,30	4,97	1,91	4,20	63	0,06
КХС			III	2	2,70	1,81	0,70	0,136	0,22	4,98	2,03	3,03	46	0,09

Примечание. Принятые сокращения и обозначения см. в таблице 1.



**Рис. 14. Кокшайутское месторождение. Разрез по профилю II в изолиниях комплексного петрофизического коэффициента (Кпк):**

1 – рудное тело, ооконтуренное по бортовому содержанию меди: 0,3 % (а), 4–0,7 % (б), 2 – изолинии Кпк; см. услов. обозн. к рис. 11

ёмкостными и несколько пониженными упруго-прочностными параметрами; значения Кпк от  $-0,92$  до  $-0,42$ , в среднем  $-0,71$  (см. табл. 4). В целом их свойства, свидетельствующие об упругой деформационной природе, близки к установленным на Кокшайутском месторождении (см. табл. 2). Андезидациты, дациты, риодациты (лавы, лавобрекчии) по параметрам принципиально не отличаются от своих интрузивных аналогов (комагматов). Значения Кпк для их слабоизменённых разностей от  $-0,92$  до  $-0,35$ , в среднем  $-0,64$ . При мере роста степени метасоматических преобразований вулканических и плутоногенных пород как в калишпа-

товой, так и в филлизитовой зоне, отмечается резкий рост (в 2–3 раза) фильтрационных и снижение (на 20–30 %) упруго-прочностных показателей; Кпк повышается вплоть до положительных значений.

Петрофизический разрез месторождения (рис. 18) «самый однородный» из всех изученных объектов. Зона минерализации (по борт. сод.  $\text{Cu}$  0,2 %) в первом приближении может быть ооконтурена по значениям  $\text{Кпк} > -0,5$ . В стволовой («приштоковой») части системы установлены два поля положительных значений  $\text{Кпк} (> 0)$ , частично фиксирующие рудное тело с содержанием  $\text{Cu} > 0,5\%$ .

Таким образом, все породы Актотайского месторождения проницаемы для растворов и обладают повышенной склонностью к хрупким деформациям (растрескиванию при преодолении порога прочности). Несмотря на то, что основной объём штоков с повышенным ( $> 0,5\%$ ) содержанием меди сосредоточен в ксенолите вулканитов в кровле многофазного интрузива, петрофизической неоднородности разреза не отмечается. Пород, которые могли бы играть роль «флюидоупоров», нет. Как следствие – низкие содержания металлов в рудах при значительном объёме минерализованных пород, что, несомненно, негативно отразилось при подсчёте запасов.

**Интерпретация результатов проведённых исследований.** Как показано на примере алмалыкских месторождений, морфология, параметры и строение медно-порфировых штоков зависят от «состояния» перекрывающей известняково-доломитовой толщи, способной к пластическим деформациям и игравшей роль «петрофизического экрана» на момент внедрения гранодиорит-порфиров – кварцевых монцитит-порфиров завершающей рудоносной фазы Алмалыкского плутона. Непосредственно над магматическим очагом (ситуация Алмалыкского РП) эта толща практически полностью ассимилирована фанеритовыми фазами (габбро-диоритами, диоритами) и присутствует лишь в виде «реликтовых полей» мраморов на флангах рудного поля и ксенолитов в самом массиве. Рудоносные порфировые штоки внедрялись в основном в благоприятные для хрупких деформаций сиенито-диориты, являющиеся продуктами этой ассимиляции. В результате в эндо-экзоконтактных зонах порфировых штоков сформировались крупно-объёмные штоки со значительным вертикальным размахом, отчётливой выраженной зональностью, сравнительно невысокими содержаниями металлов в рудах и широкомасштабными над рудными геохимическими ореолами. Строение этих штоков, основные запасы которых сосредоточены в надынтривных зонах, свидетельствует о центробежной тенденции их наращивания от ранней к поздней стадии развития, сменяющейся центростремительной на

завершающей. Эта тенденция может интерпретироваться как «свободное» разрастание рудовмещающих трещинных каркасов в надинтрузивных областях (с сопряжённым минералообразованием в возникавших полостях), которое по мере «затухания» магматического очага (источника энергии и металлоносных флюидов) сменялось отложением поздних минеральных ассоциаций на более глубоких уровнях МПС. Основными механизмами образования рудовмещающих трещин являлись гидроразрыв из-за избыточного газового давления (так называемое «вторичное вскипание») расплава при кристаллизации) и контракция при термической усадке остывающих порфировых интрузивов. Последняя приводила также к обрушению пород вскрыши с приоткрыванием древних трещин различного генезиса.

Рудообразующие минеральные ассоциации ранней и средней (основной продуктивной) стадий формирования штокверков отлагались высококонцентрированными солевыми растворами в эндо-экзоконтактных областях порфировых штоков, подверженных раннему К-кремниевому высокотемпературному метасоматозу (калишпатовая зона). В образовании ассоциаций поздней стадии с полисульфидами, Au и Ag, развитых в основном во внешней подзоне наложенной филлизитовой и внутренней альбит-эпидот-карбонат-хлоритовой подзоне пропиловитовой зоны, ведущую роль, по-видимому, играли кислые по составу, «смешанно-флюидные» растворы с метеорной составляющей. «Сухие» прожилки завершающих ассоциаций, ареалы распространения которых «смещаются» в направлении к осевым частям штокверков, вероятно, являются продуктами ремобилизации рудного вещества такими растворами на этапе затухания магматического очага.

Характеристики и пространственно-временные тенденции эволюции рудоносных штокверков Коксайского и Актогайского месторождений в целом подобны выявленным для объектов Алмалыкского РП, за исключением более высоких густоты рудных прожилков и содержаний металлов в рудах на первом объекте (из-за пластинообразной формы крутопадающего порфирового интрузива, ветвящегося по восстановлению на серию даек) и, наоборот, пониженных – на втором (в отсутствии «экранирующих» толщ).

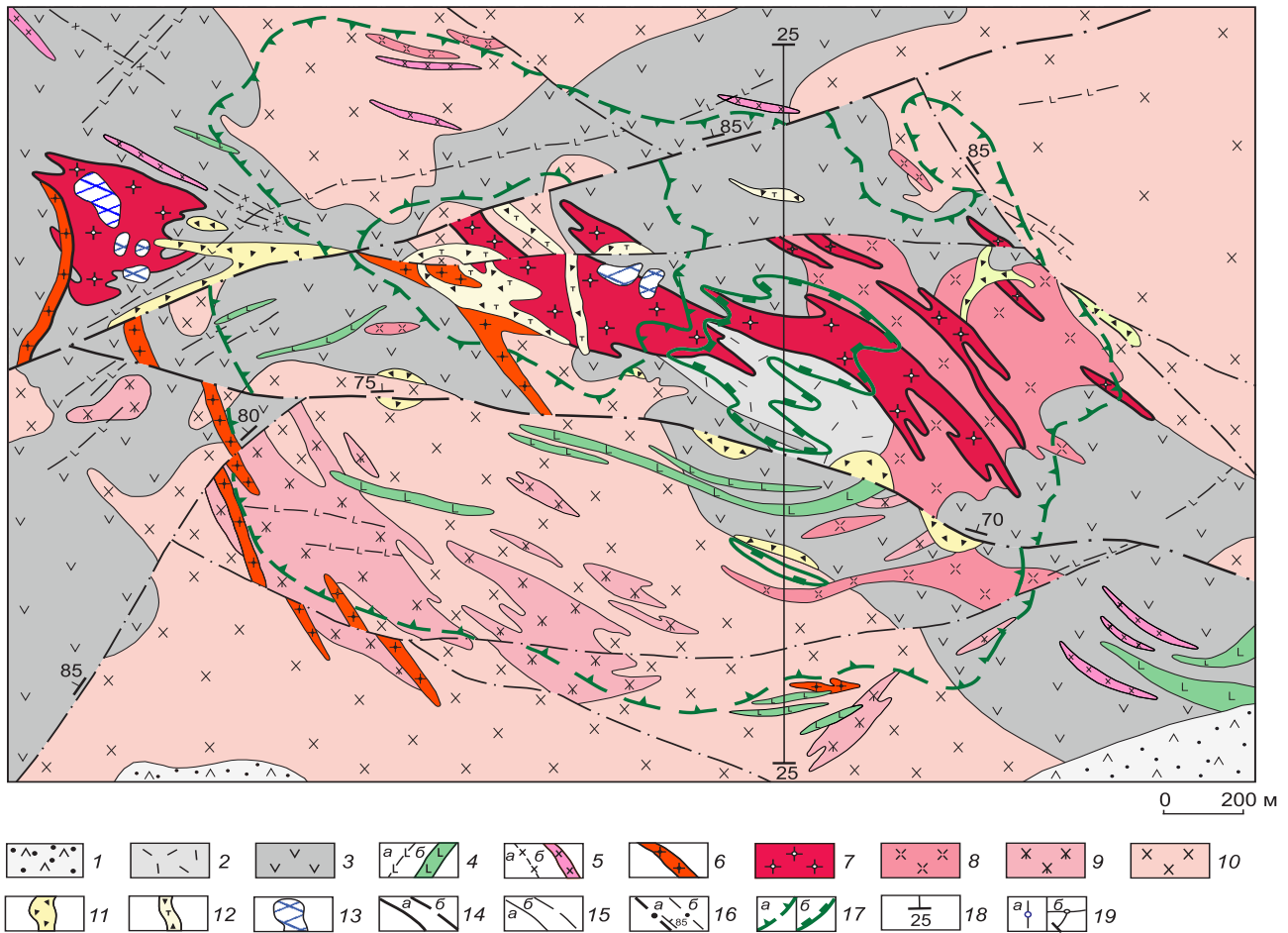
Иная ситуация на Каульдинском и Саукбулакском РП, медно-порфировые объекты которых ассоциируют с порфировыми штоками, являющимися апофизами фланговых частей Алмалыкского плутона. Здесь магматического давления явно «не хватило» для прорыва мощной известняково-доломитовой толщи, способной к пластическим деформациям при высоких температурах и давлении. Расплав «расплылся» под ней, что привело к возникновению лак-

коллитоподобных порфировых интрузивов и линзообразной форме сопряжённых с ними штокверков. Для месторождения Кызата–Сары-Чеку и Нижнекаульдинского рудопроявления выявлены «спрессованность» рудно-метасоматических колонок с вмещением в пространстве ареалов развития разновозрастных минеральных ассоциаций, сравнительно небольшой вертикальный размах оруденения при угнетённом развитии надрудных геохимических ореолов. Для детально изученного штокверка месторождения Кызата характерны повышенные густота рудных прожилков и жил и соответственно содержания металлов в рудах, а также центростремительная тенденция наращивания от ранней к поздней стадии развития, противоположная выявленной на остальных изученных объектах. Она может быть обусловлена последовательным заполнением трещинного и порового пространства минеральным веществом в направлении вниз (вглубь порфирового интрузива) от контактов с вышележащей «экранирующей» карбонатной толщей.

Установленные противоположные тенденции наращивания штокверков в описанных обстановках не противоречат результатам минералого-геохимических исследований месторождений Актогай, Айдарлы и Кызата [10], позволившим по изотопному составу кислорода кварца разновозрастных рудообразующих ассоциаций оценить долю участия амагматичных вод в рудогенезе. Полученные данные свидетельствуют не только о росте метеорной составляющей в гидротермальных растворах к поздним стадиям рудоотложения, что уже известно на протяжении десятилетий, но и о существенной разнице в объёмах таких вод, вовлечённых в конвекцию в разных частях РМС (рис. 19).

На первых двух объектах, по формам рудных тел отнесённых к первому и второму морфологическим типам МПМ, доля таких вод, рассчитанная по значениям  $\delta^{18}\text{O}_{\text{кв}}$  кварца продуктивной кварц-молибденит-(борнит)-халькопирит-пиритовой ассоциации, максимальна (до 85 %) в верхних периферических частях МПС и минимальна во внутренних (менее 35 %), что согласуется с центробежной тенденцией наращивания штокверков и метасоматической зональностью, выраженной сменой с глубиной аргиллизитов и филлизитов биотит-калишпатовыми (биотитовыми) метасоматитами, и в целом не противоречит математическим моделям тепло-массопереноса, рассмотренным в [13, 17, 28, 33, 35 и др.].

На месторождении Кызата, локализованном под малопроницаемой, пластично деформировавшейся, карбонатной толщей (четвёртый морфологический тип), расчётная доля метеорной составляющей в растворах, участвовавших в отложении основной



**Рис. 15. Актогайское Мо-Си-порфировое месторождение. Геологический план поверхности (со «снятыми» четвертичными рыхлыми отложениями). Составлен с использованием материалов Актогайской ГРП:**

1 – колдарская свита ( $C_3-P_1kl$ ): риолиты, риодациты, андезидациты, туфы того же состава, туфоконгломераты, туфопесчаники, песчаники, алевролиты; 2–3 – кергетасская свита ( $C_{2-3}kg_1$ ): 2 – риолиты, риодациты (лавы, лавобрекчии, туфолавы, туфы средне-грубообломочные и агломератовые), 3 – андезиты, андезидациты (лавы, лавобрекчии, туфобрекчии, туфы); 4–13 – интрузивные породы Колдарского массива ( $C_{2-3}$ ): 4–6 – дайки и дайкоподобные тела: 4 – диабазов мощностью до 10 м (а) и свыше 10 м (б), 5 – лампрофиров, микродиоритов, аплитов, диоритовых порфиров, 6 – плагиогранит-порфиров, 7 – рудоносные гранодиорит-порфиры, 8 – порфировидные гранодиориты, 9 – средне- и неравномернозернистые кварцевые диориты, гранодиориты, 10 – среднезернистые диориты и габбро-диориты, 11–12 – брекчиевые тела: 11 – с серицитизированным цементом, 12 – с турмалиновым цементом; 13 – участки интенсивного штокверкового окварцевания («кварцевые ядра»); 14–15 – контакты пород, установленные (а) и предполагаемые (б); 14 – рудоносных порфировых интрузивов, 15 – вмещающих и пострудных; 16 – разломы: а – крупные (с элементами падения), б – мелкие; 17 – рудное тело, оконтуренное по бортовому содержанию меди 0,2 % (а) и 0,5 % (б); 18 – линия разведочного профиля 25; 19 – положение скважин: на геологическом плане (а) и разрезе по профилю 25 (б)

продуктивной ассоциации, в направлении к периферии объекта (по мере удаления от крупного разлома, к зоне которого предположительно приурочена корневая часть рудоносного интрузива) уменьшается приблизительно с 70 до 45 %. Выявленная «противоположная» изотопная зональность отражает центростремительную направленность наращивания штокверка под структурно-петрофизическим экраном со смещением области рудоотложения из апикальных в глубинные (корневые) части порфирового интрузива.

К сожалению, в число изученных объектов не попали МПМ, сформированные под толщами с упруго-вязкой деформационной природой. Судя по [32], к ним относятся уникальные по запасам Си-Мо-порфировые месторождения андийских ВПП – Эль Теньенте, Рио Бланко–Лос Бронсес, Лос Пеламбрес и др. в Чили, на которых широко распространены многофазные брекчиевые тела, возникшие при неоднократном «взрывном» прорыве «экранирующей» андезитовой толщи формации Фареллонес. Крупное Коунрадское

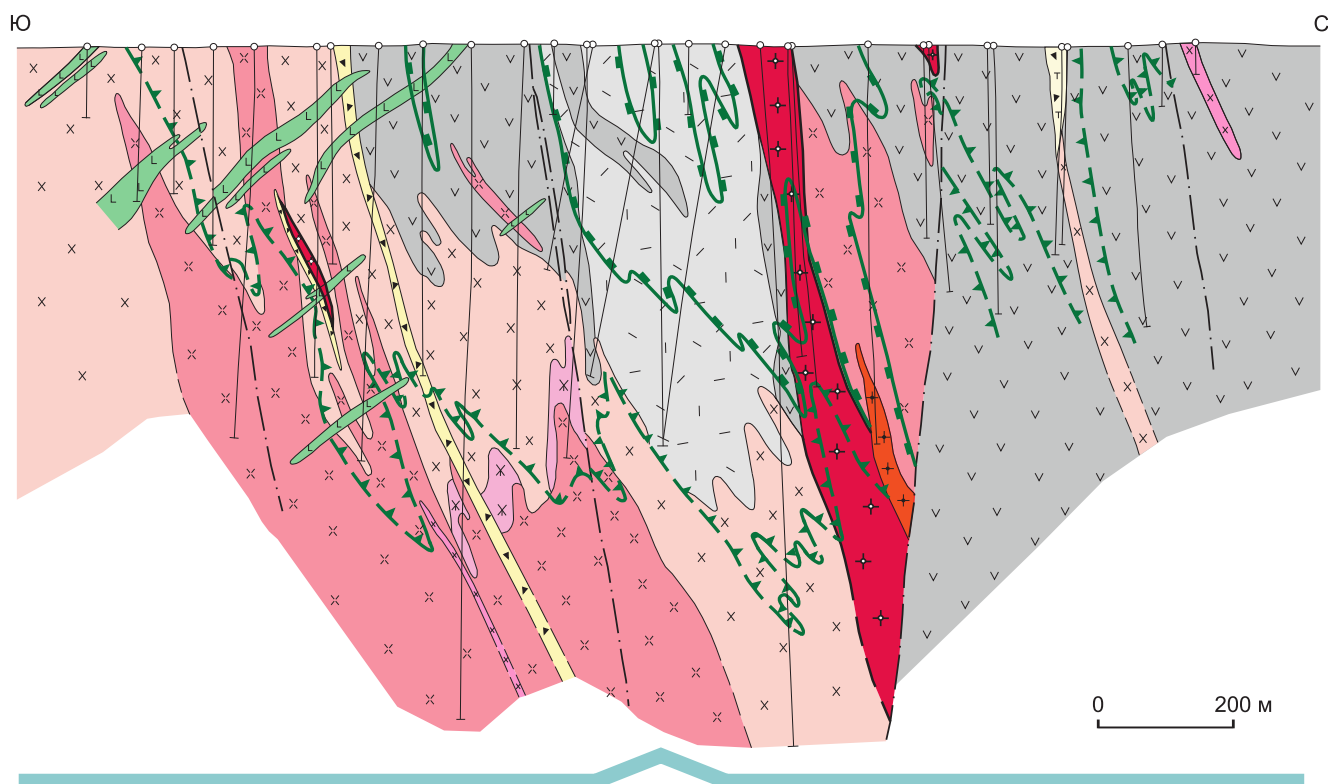


Рис. 16. Актогайское Мо-Си-порфировое месторождение. Геологический разрез по профилю 25. Составлен с использованием материалов Актогайской ГРП:

см. услов. обозн. к рис. 15

месторождение в Казахстане, верхи геологического разреза которого сложены малопроницаемыми апо-эффузивными кварцитами с аномально высокими упруго-прочностными параметрами, также может быть отнесено к этой группе объектов.

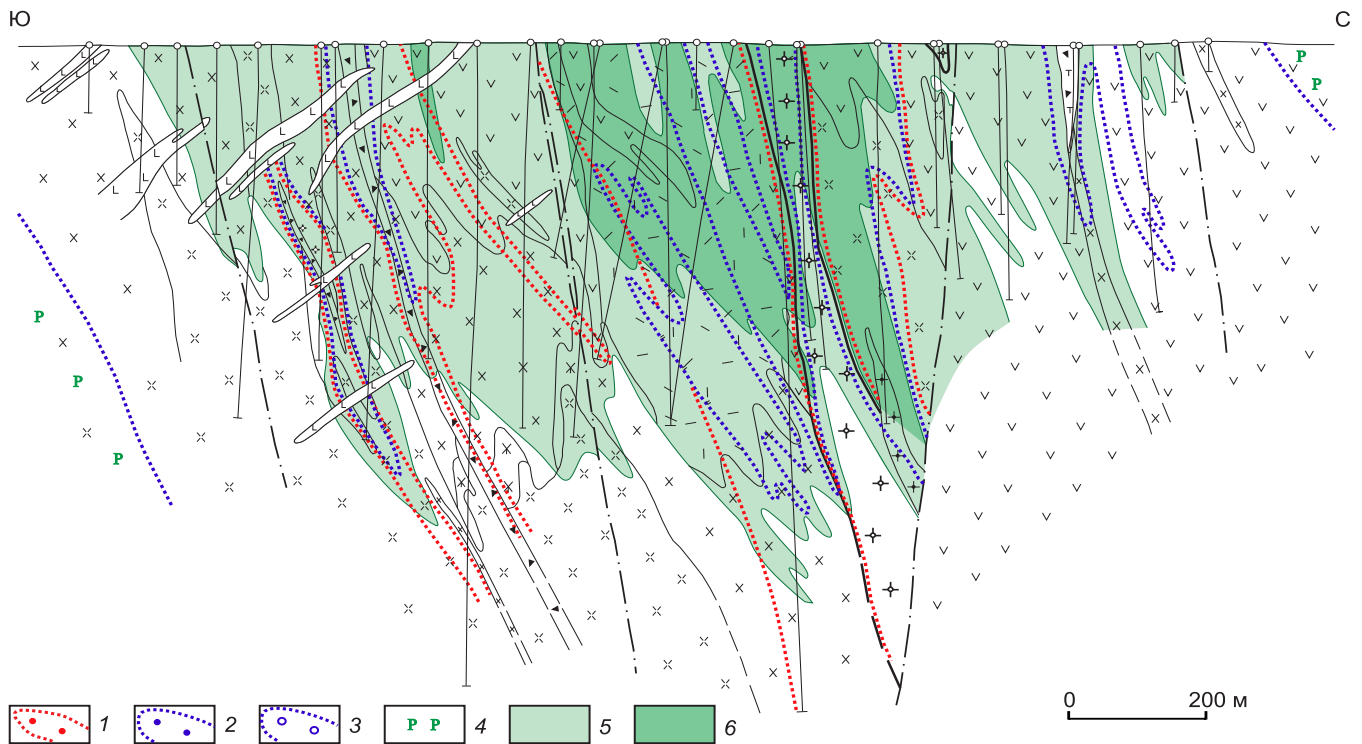
На ряде гигантских МПМ среди вмещающих пород отмечаются блоки субстрата (фундамента) ВПП, сложенные гнейсами и амфиболитами как на месторождении Эрдэнтуин-Обо (Монголия) либо мафическими породами, такими как габбро-диабаз-базальтовый комплекс Теньенте на месторождении Эль Теньенте (Чили), силлы протерозойских диабазов на Резольюшон и Рэе (США), толеитовые базальты на Оюу Толгое (Монголия). Богатые железом базитовые комплексы являлись геохимическими барьерами, вызывавшими осаждение меди из окисленных гидротермальных растворов, поэтому в них сосредоточена как минимум половина запасов высокосортных руд названных месторождений [41]. Но эти комплексы также могли оказывать «экранирующее» воздействие, поскольку обладают упруго-вязким поведением при деформациях, о котором можно судить по изученным автором [6] физико-механическим свойствам близких по составу траппов и гипербазитов Норильского района.

Исследование физико-механических свойств пород разнотипных месторождений показало, что ран-

нее высокотемпературное К-кремниевое и более позднее кислотное изменение приводят к значительному росту фильтрационных характеристик, снижению упругости и твердости. Их способность к растрескиванию и проницаемость для гидротермальных растворов существенно возрастают. Рудовмещающие фации метасоматитов могут быть выделены по значениям  $K_{пк}$  и  $K_{ап}$ , что может быть использовано в качестве дополнительного петрофизического критерия при оконтуривании минерализованных зон.

#### Выводы.

1. МПМ «мирового класса» формировались в специфических геодинамических обстановках в отдельных сегментах андезитоидных и базальтоидных ВПП, на ранних стадиях развития которых господствовал режим коллизионного сжатия, приведший к возникновению мощных флюидонасыщенных магматических очагов в верхней части ЗК, и благоприятных структурно-петрофизических условиях их «разгрузки», способствовавших рудонакоплению в значительных масштабах. Уникальные по запасам месторождения возникали при наличии над рудоносными «материнскими» плутонами мощной вскрыши пород с упруго-пластичной либо упруго-вязкой деформационной природой. Такие малопроницаемые толщи наряду с латеральным сжатием на ранних стадиях



**Рис. 17. Актогайское Mo-Cu-порфировое месторождение. Метасоматическая зональность и меднорудное тело в разрезе по профилю 25:**

1–3 – зоны гидротермально-метасоматических изменений: 1 – биотит-калишпатовая, 2–3 – филлизитовая: 2 – внутренняя подзона, 3 – внешняя подзона; 4 – пропилитовая; 5–6 – рудное тело, оконтуренное по бортовому содержанию меди: 5 – 0,2 и 6 – 0,5 %; см. услов. обозн. к рис. 15

эволюции поясов способствовали накоплению флюидов и металлов в головных частях магматических колонн. В период их «вскрытия» при инверсии тектонических напряжений с декомпрессией и прорывом остаточного металлоносного расплава на гипабиссальные и субвулканические уровни ЗК они играли роль структурно-петрофизических «экранов» («флюидоупоров») для металлоносных растворов. Карбонатные отложения (доломиты, известняки) и богатые железом базитовые комплексы в составе таких толщ являлись также геохимическими барьерами, приводившими к отложению высокосортных руд.

2. Петрофизическая неоднородность рудовмещающей среды способствовала рудоконцентрации. В присутствии малопроницаемой толщи над «материнским» плутоном (промежуточным очагом) рудотложение из высококонцентрированного раствора (рассола), отделявшегося от остаточного расплава, происходило преимущественно в эндо-экзоконтактных зонах порфировых штоков – выступов-апофиз этого интрузива, являвшихся «проводниками» тепла и рудного вещества. «Экранировавшие» толщи препятствовали проникновению металлоносных флюидов

в верхние и периферийные части РМС, где в иных условиях «смешанно-флюидными» растворами с участием активизированных метеорных вод могли отлагаться поздние рудообразующие минеральные ассоциации. Об этом свидетельствуют безрудные аргиллизитовые «шляпы» большинства МПМ мирового класса при повышенных содержаниях металлов в штокверках, охватывающих апикальные и экзоконтактные зоны порфировых интрузивов. В РМС с Au-Mo-Cu- и Au-Cu-порфировыми месторождениями базальтоидных и ряда андезитовидных поясов, в субстрате которых широко развиты карбонатные и терригенно-карбонатные формации, присутствие последних над рудоносными интрузивами препятствовало подъёму лёгкой газовой фазы, отделявшейся от кристаллизующегося «остаточного» расплава и обогащённой благородными металлами, в верхние части ЗК, где в «обычных» условиях их разгрузка приводила к образованию эпитермальных Au-Cu и Au-Ag стратойдных и жильных месторождений типа «высокой» (HS) и «средней сульфидизации» (IS). Крупные объекты подобных «подэкранных обстановок выделяются аномально высокими (для МПМ)

содержаниями золота (г/т) в собственно порфириновых рудах. Значительная часть запасов меди и золота при этом сосредоточена в скарновых залежах в экзоконтактах порфириновых штоков.

В отсутствии «литолого-структурных ловушек» разгрузка восходящего из очага флюидного потока приводила к «распылению» рудного вещества с образованием обширных минерализованных ореолов с низкими содержаниями металлов (геохимических аномалий) либо мелких объектов со сравнительно бедными рудами. В Казахстане их примерами являются месторождения Борлы, Кенькудук, Каскыр-Казган, Кепчам, Аузбыкы и др., в России – месторождения Михеевское, Томинское, Зеленый Дол на Урале, рудопроявления Ольховка, Ракетное, Базовое в Чукотском АО, Лора, Уптар, Викинг, Антара, Прямой в Магаданской области и множество других. Причинами небольших запасов убогих руд перечисленных объектов являлись, по-видимому, не только «ограниченный» металлоносный потенциал магматических очагов, но и отсутствие толщ, игравших роль петрофизических и геохимических барьеров («флюидоупоров»).

3. Структурно-петрофизические обстановки влияли как на морфологию рудоносных порфириновых интрузивов, так и на форму, строение и параметры сопряжённых с ними медно-порфириновых штоков, включая содержания металлов в рудах.

При «вскрытии» магматического очага гипсометрический уровень подъёма металлоносного остаточного расплава, «инкапсулированного» в период охлаждения и кристаллизации фанеритовых фаз в ядерных частях «материнского» плутона, зависел от соотношения магматического и литостатического (мощности вскрыши) давлений, содержаний  $\text{SiO}_2$  и летучих компонентов, определяющих вязкость и соответственно скорость его подъёма, а также от петрофизических характеристик окружающей среды. В зависимости от деформационной природы вмещающих пород формировались порфириновые интрузивы различной морфологии (штоки, дайки) либо брекчиевые тела. Обычная их вертикальная протяжённость до первых километров. Завершающие «рудоносные» порции расплава (порфириновые фазы) в большинстве случаев внедрялись в благоприятные для хрупких деформаций породы интрузивной рамы, включая «гибридные» гранитоиды, возникавшие при ассимиляции карбонатных толщ, в ряде случаев достигая и прорывая перекрывающие отложения. В этом случае формировались крупнообъёмные штокверки первых трёх морфологических типов (по классификации А. И. Кривцова и др. [17]) с отчётливой зональностью и относительно невысокими содержаниями металлов, сопровождающиеся хорошо проявленными надруд-

ными геохимическими ореолами. Для них установлена центробежная (от контактов порфириновых интрузивов во вмещающие породы) направленность наращивания от ранней к поздней стадии формирования, сменяющаяся центростремительной на завершающей стадии.

При «ограниченном» энергетическом потенциале небольшого очага либо сателлита крупного, как на Каульдинском и Саукбулакском РП Алмалыкского РР, мощная перекрывающая карбонатная толща могла быть не полностью ассимилирована фанеритовыми фазами интрузивного массива. Сравнительно небольшое давление остаточного металлоносного расплава в сочетании со способностью доломитов и известняков к пластическим деформациям при высоких температурах привело к уплощённым формам порфириновых интрузивов и локализованных в их апикальных частях штоков (четвёртый морфологический тип). Для них характерны наложение в пространстве ареалов развития новообразованных минеральных ассоциаций, сравнительно небольшой вертикальный размах оруденения (первые сотни метров) при угнетённом развитии надрудных геохимических ореолов, повышенные густота рудных прожилков и жил и соответственно концентраций металлов в рудах, а также центростремительная тенденция наращивания от ранней к поздней стадии развития, интерпретируемая как последовательное заполнение трещинного и порового пространства минеральным веществом в направлении вниз (вглубь порфиринового интрузива) от контактов с вышележащей «экранировавшей» карбонатной толщ.

В варианте мощных перекрывающих толщ с упруго-вязкой деформационной природой, подобных андезитовым лавам формации Фареллонес, рудоносные интрузивы обычно локализованы на одном уровне либо под ними. Значительная доля запасов руд сопряжённых с ними штоков сосредоточена в апикальных частях порфириновых штоков и брекчиевых трубках, возникших из-за избыточного давления газов, которые отделялись из кристаллизующейся магмы и скапливались под подобными малопроницаемыми толщами с повышенными прочностными свойствами, но склонными к хрупкому разрушению. Неоднократный прорыв флюидов со взрывным растрескиванием окружающих пород приводил к образованию многофазных, сложнопостроенных тел эруптивных брекчий, вмещающих значительные объёмы руд как на гигантских Cu-Mo-порфириновых месторождениях Эль Теньенте, Рио Бланко–Лос Бронсес, Лос Пеламбрес и др. в Чили. Формы рудных тел самые разнообразные – от воронко- и трубообразной (цилиндрической) до сложной комбинированной, зависящей от морфологии порфириновых интрузивов и «надстраивающих» их брекчиевых тел. Содержания металлов

4. Физико-механические свойства пород Мо-Си-порфирового месторождения Актогай

Исходные породы	Метасоматические зоны и подзоны МПС		Новообразованные минеральные ассоциации	Интенсивность изменения	n	ρ	P <sub>эф</sub>	A
	Зона	Подзона						
1	2	3	4	5	6	7	8	9
Диабазы (дайка, C <sub>3</sub> )			Сер-Хл	I	1	2,78	0,48	0,11
Аплиты (дайка, C <sub>2-3</sub> )			Сер-Кар	II	1	2,59	0,52	0,17
Эруптивные брекчи с серицитовым цементом (C <sub>2-3</sub> )	Калишпатовая		Сер (по цементу)/ КППШ (по обломкам)	III	1	2,63	1,51	0,40
Эруптивные брекчи с турмалиновым цементом (C <sub>2-3</sub> )	Филлизитовая	Внешняя	Сер-Хл (по цементу и обломкам)	III	4	$\frac{2,65-2,70}{2,67}$	$\frac{1,03-1,94}{1,39}$	$\frac{0,52-1,01}{0,68}$
Гранодиорит-порфиры (C <sub>2-3</sub> )	Калишпатовая		КППШ/Сер-Хл	II	1	2,68	0,53	0,20
			КППШ/Сер-Хл	III	1	2,62	1,06	0,34
			КППШ	IV	1	2,62	1,55	0,60
	Филлизитовая	Внешняя	Би/Сер-Хл	I	1	2,79	0,61	0,20
			Сер-Хл	II	5	$\frac{2,65-2,78}{2,67}$	$\frac{0,92-1,36}{1,09}$	$\frac{0,26-0,43}{0,35}$
			Сер-Хл	III	2	$\frac{2,58-2,67}{2,63}$	$\frac{1,44-2,03}{1,74}$	$\frac{0,43-0,46}{0,45}$
	Внутренняя	Кв-Сер	IV	1	2,53	3,96	2,76	
Гранодиориты порфировидные (C <sub>2-3</sub> )	Калишпатовая		КППШ/Сер-Хл	I	1	2,68	0,40	0,10
			КППШ/Сер-Хл	II	3	$\frac{2,66-2,69}{2,67}$	$\frac{0,65-1,31}{0,95}$	$\frac{0,20-0,51}{0,34}$
	Филлизитовая	Внешняя	Сер-Хл	I	1	2,69	0,47	0,10
			Сер-Хл	II	3	$\frac{2,67-2,72}{2,70}$	$\frac{0,53-0,81}{0,65}$	$\frac{0,10-0,25}{0,18}$
		Внутренняя	Хл-Сер	III	3	$\frac{2,62-2,69}{2,65}$	$\frac{0,94-1,83}{1,48}$	$\frac{0,33-0,54}{0,42}$
Кварцевые диориты среднезернистые (C <sub>2-3</sub> )	Филлизитовая	Внешняя	Сер-Хл	I	1	2,72	0,35	0,15
Диориты среднезернистые (C <sub>2-3</sub> )	Калишпатовая		Би-КППШ/Сер-Хл	I	5	$\frac{2,66-2,73}{2,69}$	$\frac{0,38-0,53}{0,49}$	$\frac{0,05-0,26}{0,14}$
			КППШ/Сер-Хл	II	4	$\frac{2,64-2,75}{2,68}$	$\frac{0,84-1,40}{1,20}$	$\frac{0,28-0,45}{0,36}$
			КППШ	III	2	$\frac{2,59-2,64}{2,62}$	$\frac{0,82-1,29}{1,06}$	$\frac{0,22-0,25}{0,24}$
	Филлизитовая	Внешняя	Би/Сер-Хл Сер-Хл	I	6	$\frac{2,68-2,76}{2,71}$	$\frac{0,40-0,58}{0,48}$	$\frac{0,10-0,19}{0,13}$
			Сер-Хл	II	7	$\frac{2,68-2,82}{2,75}$	$\frac{0,49-1,71}{0,85}$	$\frac{0,20-0,40}{0,32}$
			Хл-Сер	III	5	$\frac{2,69-2,70}{2,70}$	$\frac{1,00-1,71}{1,36}$	$\frac{0,30-0,72}{0,49}$
		Внутренняя	Кв-Сер	IV	1	2,70	1,95	0,77
Риодациты, дациты (лавы) (C <sub>2-3</sub> , kg <sub>1</sub> )	Филлизитовая	Внешняя	Сер-Хл, Сер	II	2	$\frac{2,66-2,74}{2,70}$	$\frac{0,47-0,58}{0,53}$	$\frac{0,17-0,33}{0,25}$
Внутренняя		Кв-Хл-Сер	III	6	$\frac{2,59-2,64}{2,61}$	$\frac{0,87-1,49}{1,32}$	$\frac{0,20-0,82}{0,48}$	

В	μ	Е	G	K <sub>сж</sub>	θ	НВ	Кпк
10	11	12	13	14	15	16	17
0,01	0,32	7,38	2,79	6,89	450	233	-1,02
0,04	0,27	6,81	2,68	4,96	447	260	-0,40
0,04	0,28	5,06	1,98	3,76	384	214	0,04
<u>0,03-0,05</u> 0,04	<u>0,26-0,36</u> 0,30	<u>4,79-7,00</u> 5,90	<u>1,76-2,77</u> 2,27	<u>4,72-5,63</u> 5,04	<u>363-452</u> 410	<u>148-236</u> 215	<u>(-0,12)-(-0,02)</u> -0,06
0,01	0,24	7,60	3,07	4,80	474	280	-0,41
0,02	0,27	6,45	2,55	4,60	435	164	-0,06
0,03	0,25	6,29	2,51	4,21	431	136	0,23
0,02	0,30	7,40	2,86	6,05	453	238	-0,76
<u>0,02-0,04</u> 0,03	<u>0,26-0,30</u> 0,29	<u>5,78-6,84</u> 6,17	<u>2,23-2,68</u> 2,41	<u>4,23-5,15</u> 4,79	<u>408-438</u> 421	<u>126-229</u> 179	<u>(-0,45)-(-0,06)</u> -0,20
<u>0,02-0,03</u> 0,03	<u>0,26</u> 0,26	<u>5,90-6,26</u> 6,08	<u>2,34-2,49</u> 2,42	<u>4,15-4,35</u> 4,25	<u>417-428</u> 423	<u>140-211</u> 176	<u>0,02-0,30</u> 0,16
0,08	0,26	3,83	1,52	2,63	338	144	1,00
0,04	0,25	7,40	2,95	5,00	466	242	-0,71
<u>0,02-0,04</u> 0,03	<u>0,25-0,28</u> 0,26	<u>6,50-7,12</u> 6,90	<u>2,58-2,85</u> 2,73	<u>4,53-5,32</u> 4,85	<u>436-457</u> 449	<u>162-246</u> 201	<u>(-0,37)-0,03</u> -0,21
0,03	0,26	7,37	2,93	5,07	464	211	-0,68
<u>0,01-0,03</u> 0,02	<u>0,25-0,27</u> 0,26	<u>7,11-7,47</u> 7,30	<u>2,84-2,96</u> 2,90	<u>4,77-5,25</u> 5,08	<u>457-465</u> 461	<u>188-211</u> 203	<u>(-0,59)-(-0,38)</u> -0,50
<u>0,02-0,03</u> 0,02	<u>0,20-0,29</u> 0,23	<u>5,80-6,65</u> 6,25	<u>2,25-2,75</u> 2,55	<u>3,45-4,52</u> 3,93	<u>410-447</u> 432	<u>139-177</u> 159	<u>(-0,02)-0,33</u> 0,13
0,02	0,23	7,29	2,96	4,52	463	211	-0,68
<u>0,02-0,04</u> 0,02	<u>0,26-0,32</u> 0,28	<u>6,30-7,45</u> 7,05	<u>2,39-2,96</u> 2,76	<u>5,03-5,75</u> 5,28	<u>423-467</u> 451	<u>166-233</u> 198	<u>(-0,92)-(-0,42)</u> -0,70
<u>0,02-0,04</u> 0,03	<u>0,21-0,31</u> 0,26	<u>5,41-7,04</u> 6,45	<u>2,06-2,90</u> 2,56	<u>4,11-4,97</u> 4,56	<u>393-455</u> 433	<u>155-233</u> 207	<u>(-0,27)-0,02</u> -0,12
<u>0,03-0,04</u> 0,04	<u>0,24-0,26</u> 0,25	<u>6,04-6,77</u> 6,41	<u>2,39-2,73</u> 2,56	<u>4,25-4,29</u> 4,27	<u>421-450</u> 436	<u>177-242</u> 210	<u>(-0,10)-(-0,07)</u> -0,09
<u>0,03-0,06</u> 0,04	<u>0,26-0,29</u> 0,27	<u>7,24-7,78</u> 7,52	<u>2,86-3,09</u> 2,96	<u>5,09-6,02</u> 5,41	<u>462-472</u> 465	<u>152-246</u> 198	<u>(-0,86)-(-0,50)</u> -0,71
<u>0,02-0,07</u> 0,03	<u>0,26-0,31</u> 0,28	<u>5,10-7,66</u> 6,67	<u>1,95-3,01</u> 2,60	<u>4,43-5,58</u> 5,16	<u>376-466</u> 433	<u>152-201</u> 182	<u>(-0,60)-(-0,21)</u> -0,47
<u>0,03-0,06</u> 0,05	<u>0,23-0,30</u> 0,27	<u>4,51-6,75</u> 5,51	<u>1,73-2,73</u> 2,17	<u>3,75-4,24</u> 4,04	<u>359-447</u> 398	<u>87-201</u> 142	<u>(-0,17)-0,06</u> -0,09
0,04	0,30	5,02	1,98	4,16	377	163	0,05
<u>0,03-0,04</u> 0,04	<u>0,23</u> 0,23	<u>6,97-7,61</u> 7,29	<u>2,82-3,09</u> 2,96	<u>4,37-4,73</u> 4,55	<u>451-476</u> 464	<u>185-251</u> 218	<u>(-0,47)-(-0,37)</u> -0,42
<u>0,02-0,09</u> 0,04	<u>0,28-0,32</u> 0,30	<u>5,52-6,79</u> 5,87	<u>2,03-2,63</u> 2,26	<u>3,93-5,46</u> 4,91	<u>397-444</u> 411	<u>153-286</u> 214	<u>(-0,28)-0,06</u> -0,04

1	2	3	4	5	6	7	8	9
Андезидациты (лавы) ( $C_{2-3}kg_1$ )	Калишпатовая		КПШ/Сер-Хл	I	1	2,71	0,48	0,24
			КПШ/Сер-Хл	II	2	$\frac{2,67-2,68}{2,68}$	$\frac{0,90-1,01}{0,96}$	$\frac{0,29-0,42}{0,36}$
			КПШ/Хл-Сер	III	5	$\frac{2,62-2,69}{2,65}$	$\frac{1,05-1,25}{1,14}$	$\frac{0,24-0,42}{0,34}$
	Филлизитовая	Внешняя	Сер-Хл	I	6	$\frac{2,69-2,74}{2,72}$	$\frac{0,35-0,60}{0,44}$	$\frac{0,09-0,25}{0,16}$
			Сер-Хл	II	5	$\frac{2,65-2,86}{2,72}$	$\frac{0,47-1,15}{0,81}$	$\frac{0,13-0,40}{0,27}$
		Внутренняя	Кв-Хл-Сер	III	2	$\frac{2,68-2,70}{2,69}$	$\frac{0,68-0,99}{0,84}$	$\frac{0,27-0,31}{0,29}$
			Хл-Сер-Кв	IV	1	2,71	0,95	0,14
	Андезидациты (лавобрекчи) ( $C_{2-3}kg_1$ )	Калишпатовая		КПШ/Сер-Хл	I	1	2,60	0,55
Филлизитовая		Внешняя	Сер-Хл	I	4	$\frac{2,69-2,75}{2,71}$	$\frac{0,33-0,61}{0,51}$	$\frac{0,14-0,24}{0,21}$
			Сер-Хл	II	3	$\frac{2,65-2,72}{2,69}$	$\frac{0,66-0,89}{0,77}$	$\frac{0,33-0,42}{0,38}$
		Внутренняя	Кв-Сер Сер-Кв	IV	2	2,68	$\frac{0,58-0,82}{0,70}$	$\frac{0,35-0,38}{0,37}$
Андезидациты (туфы) ( $C_{2-3}kg_1$ )	Калишпатовая		КПШ/Сер-Кв	III	2	$\frac{2,66-2,67}{2,67}$	$\frac{0,65-1,25}{0,95}$	$\frac{0,35-0,71}{0,53}$

*Примечание.* Практически все разности метасоматитов в том или ином количестве содержат карбонаты и пирит; кроме последнего и кварцевых прожилках) отмечаются магнетит, молибденит, халькопирит и более редкие борнит, халькозин, сфалерит, галенит, интенсивная (полное замещение). Основные минералы метасоматитов (в названиях новообразованных ассоциаций перечислены Сер – серицит, Хл – хлорит. В числе второстепенных в них присутствуют: эпидот, актинолит, альбит, пренит, соссюрит и др. калишпатовой зоны с наложенными ассоциациями более поздней филлизитовой зоны. Физико-механические параметры (%), А – условно-мгновенное насыщение (%), В – постоянная насыщения ( $час^{-1}$ ),  $\mu$  – коэффициент Пуассона; модули упругости  $K_{пк}$  – комплексный петрофизический коэффициент; n – количество проб.

в рудах довольно высокие из-за многократного, пульсационного поступления расплава и флюидов из магматического очага, о чём свидетельствуют многочисленные рудообразующие минеральные ассоциации (на Эль Теньенте, например, 14 генераций прожилков, из которых 11 рудные [45]).

4. Очевидно, что рассмотренными ситуациями не исчерпывается многообразие возможных геодинамических и структурно-петрофизических обстановок формирования МПМ. В режимах слабого (до нейтрального) растяжения, характерных для третичных ВПП Тихоокеанского кольца, Тетиса, Карпато-Балканской и других минерагенических провинций, образовались многочисленные небольшие по запасам Au-Mo-Cu- и Au-Cu-порфиновые месторождения, часто «сопровождаемые» в верхних периферийных частях РМС эпитермальными Au-Cu- и Au-Ag стратоидными и жильными рудами HS и IS типов. Несомненно, именно эти золоторудные месторождения, такие как Лепанто, Баджио (Филиппины), Андаколло, Рефужидо (Чили), Янакоча (2400 т

Au (!) по состоянию на 2004 г., Перу), Лахоца (Венгрия) и др., представляют основной экономический интерес.

Строение и структурно-петрофизические условия формирования изученных медно-порфировых штоков также «не охватывают» все возможные ситуации. Существуют многочисленные переходные варианты систем с «промежуточными» элементами строения. Рядовые по запасам и содержаниям объекты, к числу которых принадлежит подавляющее большинство МПМ мира, по-видимому, сформировались в обстановках со «средними параметрами» магматических очагов («материнских» плутонов) и вмещающих сред.

5. Влияние «экранирующих» толщ на возникновение МПМ недооценивалось, поскольку на большинстве из них они в значительной мере ассимилированы магматическим расплавом, преобразованы наложенными метасоматическими процессами либо уничтожены эрозией и сохранились лишь на флангах рудных районов и полей или в виде ксенолитов

10	11	12	13	14	15	16	17
0,02	0,29	7,51	2,91	6,00	463	255	-0,64
<u>0,02–0,05</u> 0,04	<u>0,25–0,27</u> 0,26	<u>5,94–7,45</u> 6,70	<u>2,37–2,93</u> 2,65	<u>4,02–5,45</u> 4,74	<u>408–425</u> 421	<u>126–229</u> 179	<u>(-0,45)–(-0,06)</u> -0,20
<u>0,01–0,03</u> 0,02	<u>0,23–0,29</u> 0,26	<u>5,83–7,58</u> 6,73	<u>2,32–3,68</u> 2,80	<u>2,69–5,09</u> 4,20	<u>414–511</u> 451	<u>131–242</u> 219	<u>(-0,24)–(-0,05)</u> -0,10
<u>0,01–0,02</u> 0,02	<u>0,26–0,33</u> 0,29	<u>6,23–7,83</u> 7,21	<u>2,34–3,10</u> 2,81	<u>5,36–6,18</u> 5,62	<u>417–477</u> 453	<u>238–309</u> 269	<u>(-0,92)–(-0,66)</u> -0,77
<u>0,02–0,05</u> 0,03	<u>0,25–0,30</u> 0,27	<u>6,06–7,66</u> 7,11	<u>2,32–3,05</u> 2,80	<u>4,86–5,72</u> 5,20	<u>405–474</u> 452	<u>148–315</u> 236	<u>(-0,60)–(-0,20)</u> -0,42
<u>0,01–0,02</u> 0,02	<u>0,25–0,26</u> 0,26	<u>7,39–7,54</u> 7,47	<u>2,93–3,02</u> 2,98	<u>4,99–5,14</u> 5,07	<u>464–471</u> 468	<u>246–280</u> 263	<u>(-0,35)–(-0,18)</u> -0,27
0,02	0,27	6,72	2,64	4,96	439	238	-0,47
0,03	0,27	7,46	2,94	5,41	465	246	-0,49
<u>0,01–0,03</u> 0,02	<u>0,16–0,27</u> 0,23	<u>6,96–8,43</u> 7,78	<u>2,74–3,39</u> 3,17	<u>4,14–5,29</u> 4,85	<u>445–510</u> 479	<u>242–275</u> 263	<u>(-0,56)–(-0,35)</u> -0,47
<u>0,01–0,04</u> 0,02	<u>0,22–0,24</u> 0,23	<u>6,93–7,42</u> 7,21	<u>2,80–3,05</u> 2,93	<u>4,34–4,69</u> 4,48	<u>453–468</u> 461	<u>251–291</u> 271	<u>(-0,20)–(-0,11)</u> -0,17
<u>0,04–0,05</u> 0,05	<u>0,20–0,23</u> 0,22	<u>6,81–7,56</u> 7,19	<u>2,77–3,15</u> 2,96	<u>4,16–4,22</u> 4,19	<u>450–478</u> 464	<u>260–265</u> 263	<u>(-0,15)–(-0,12)</u> -0,14
<u>0,01–0,02</u> 0,02	<u>0,22–0,26</u> 0,24	7,17–7,30 7,24	<u>2,90–2,93</u> 2,92	<u>4,31–5,02</u> 4,67	<u>462–463</u> 463	<u>260–280</u> 270	<u>(-0,28)–0,20</u> -0,04

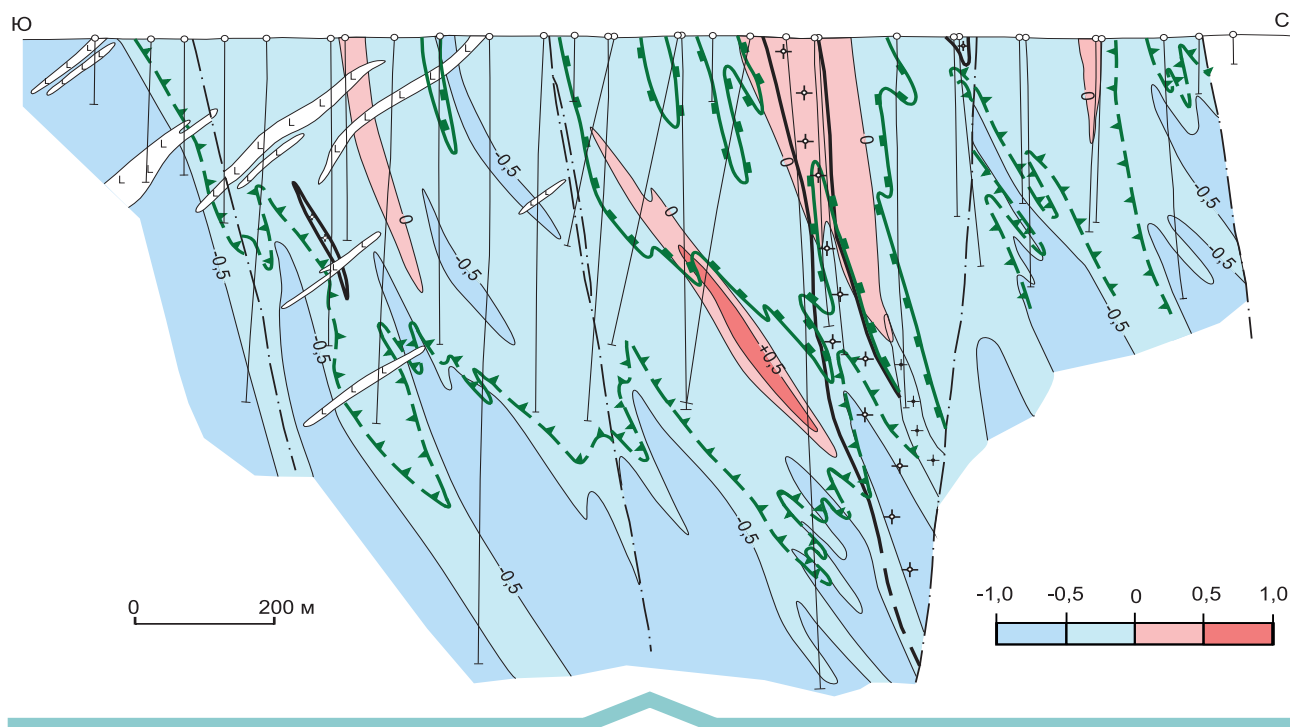
среди рудных минералов в филлизитовой и биотит-калишпатовой зонах МПС (в хлоритизированных темноцветных минералах пирротин, гематит, арсенопирит. Степень преобразования исходных пород: I – слабая, II – средняя, III – интенсивная, IV – весьма в порядке увеличения частоты встречаемости): Би – биотит, Кв – кварц, Кар – карбонаты, КПШ – калиевый полевой шпат, КПШ/Хл-Сер, КПШ/Сер-Хл, Би-КПШ/Сер-Хл, Би/Сер-Хл, КПШ/Сер-Кв – новообразованные минеральные ассоциации биотит- (в числителе интервал колебаний значений, в знаменателе – среднее значение):  $\rho$  – плотность ( $\text{г/см}^3$ ),  $\Pi_{\text{эф}}$  – эффективная пористость ( $\times 10^5 \text{ кгс/см}^2$ ): Е – Юнга, G – сдвига,  $K_{\text{сж}}$  – объемного сжатия;  $\theta$  – температура Дебая ( $^{\circ}\text{K}$ ); НВ – твердость по Бринеллю ( $\text{кгс/мм}^2$ );

в интрузивных массивах. Между тем подобные толщи отмечаются на большинстве месторождений-гигантов андийских, кордильерских, новогвинейских, азиатских ВПП. Кроме очевидного влияния на концентрацию металлов в рудах, «бронированные» толщи способствовали сохранности МПМ от эрозии. В условиях активных континентальных окраин и островных дуг, при резком воздымании тектонических блоков ЗК, месторождение может быть полностью уничтожено в короткий (в геологическом смысле) промежуток времени – десятки–сотни тысяч лет [46], чем объясняется мезозой-кайнозойский возраст большинства медно-порфировых объектов мира.

6. Критерии прогноза крупных и сверхкрупных МПМ рассмотрены в недавней работе [7]. По материалам исследований, изложенных в настоящей статье, одним из таких критериев следует признать наличие слабопроницаемых («экранирующих») толщ, подобных вышеописанным, в областях развития плутоногенных формаций, продуктивных на медно-порфировое оруденение. В ряде случаев под такими толщами

могут быть скрыты как крупные, так и рядовые по запасам месторождения, геохимические признаки которых на дневной поверхности (ВОР, потоки рассеяния и др.), выявляемые традиционными методами ГРП, слабо проявлены либо вовсе отсутствуют. Методика поисков таких объектов не разработана. Практически все известные МПМ «подэкранных» обстановок были открыты по «счастливым стечению обстоятельств».

Au-Mo-Cu-порфировое месторождение Кызата в Алмалыкском РР, локализованное под мощной (от 400 до 650 м) вскрышей вулканогенных и осадочных пород, в том числе малопроницаемых мраморизованных доломитов и известняков, обнаружено при глубоком бурении в гидрогеологических целях. Находящееся в подобных условиях однотипное Нижнекальдинское рудопоявление в опущенном центральном тектоническом блоке (вулcano-тектоническом грабене) того же района – при поисковом бурении на эпитеpmальные золото-гидрослюдисто-кварцевые руды. Крупнейшее Mo-Cu-порфировое месторождение



**Рис. 18.** Актогайское месторождение. Разрез по профилю 25 в изолиниях комплексного петрофизического коэффициента (Кпк):

см. услов. обозн. к рис. 15

Резолюцион в рудном районе Супериор в Аризоне (США с плащеобразным полого залегающим рудным телом (Cu 19 млн т (1,47 %), Mo 0,6 млн т (0,037 %) [30]), локализованным под мощной (от 1200 до 1500 м!) вскрышей меловых и третичных вулканогенных и осадочных пород на уровнях развития палеозойских карбонатных отложений и протерозойских долеритовых силлов («экранировавшие» толщи), также открыто с помощью глубокого бурения. К числу таких объектов относится и давно известное Au-Mo-Cu-порфировое месторождение Речк в Венгрии, сопряжённое с ларамийским субвулканическим штоком диоритовых порфиритов, прорывающим известняки и сланцы триаса. Оно обнаружено при разбуривании глубоких горизонтов эпитермального золото-серебро-полиметаллического жильного месторождения Лахоца.

Для создания методики поисков МПМ, скрытых под малопроницаемыми толщами, необходимы новые методы и технологические средства. Целесообразно применение глубинных методов сейсмо-, гравитационной и магниторазведки с моделированием морфологии интрузивов и нижезалегающих промежуточных магматических очагов («материнских» массивов), а также космодешифрирование для выделения кольцевых и радиальных тектонических структур, фиксирующих тектонические «просадки» над ними. Среди современных геохимических поисковых методов перспек-

тивными представляются EnzymeLeachSM и BioLeach модификации ионно-сорбционного метода, позволяющие выявлять надрудные солевые ореолы рудных месторождений, в несколько раз превосходящие по интенсивности и размерам вторичные ореолы рассеяния элементов. Апробация этого метода, основанного на частично-фазовом анализе подвижных форм, на крупнейшем Au-Mo-Cu-порфировом месторождении Пибл, Аляска, США позволила обнаружить солевой ореол Mo над перекрытым мощным (от 150 до 450 м) осадочно-вулканогенным чехлом восточным флангом этого объекта [31], где сосредоточены свыше 70 % запасов. Для МПМ в «подэкранный» позиции данный метод, возможно, позволит выявлять солевые ореолы по крупным и оперяющим разломам, рассекающим скрытые рудные тела.

Периферийные (фланговые) части пропиловых ореолов МПМ могут быть обнаружены с помощью изучения элементов-примесей (Bi, Ti, Mn, Zn, Pb, Mg, As, Sb, Sn и др.) в минералах-индикаторах, таких как эпидот, хлорит, магнетит и др., как показано в серии опытно-методических работ USGS. Они были поставлены на ряде МПМ, среди которых были как сверхкрупные объекты, сформировавшиеся под петрофизическими «экранами»: Cu-Mo-порфировые гиганты Южной Америки (Эль Теньенте одноимённого района [47], Росарио, Юджина и Куабрада Бланка

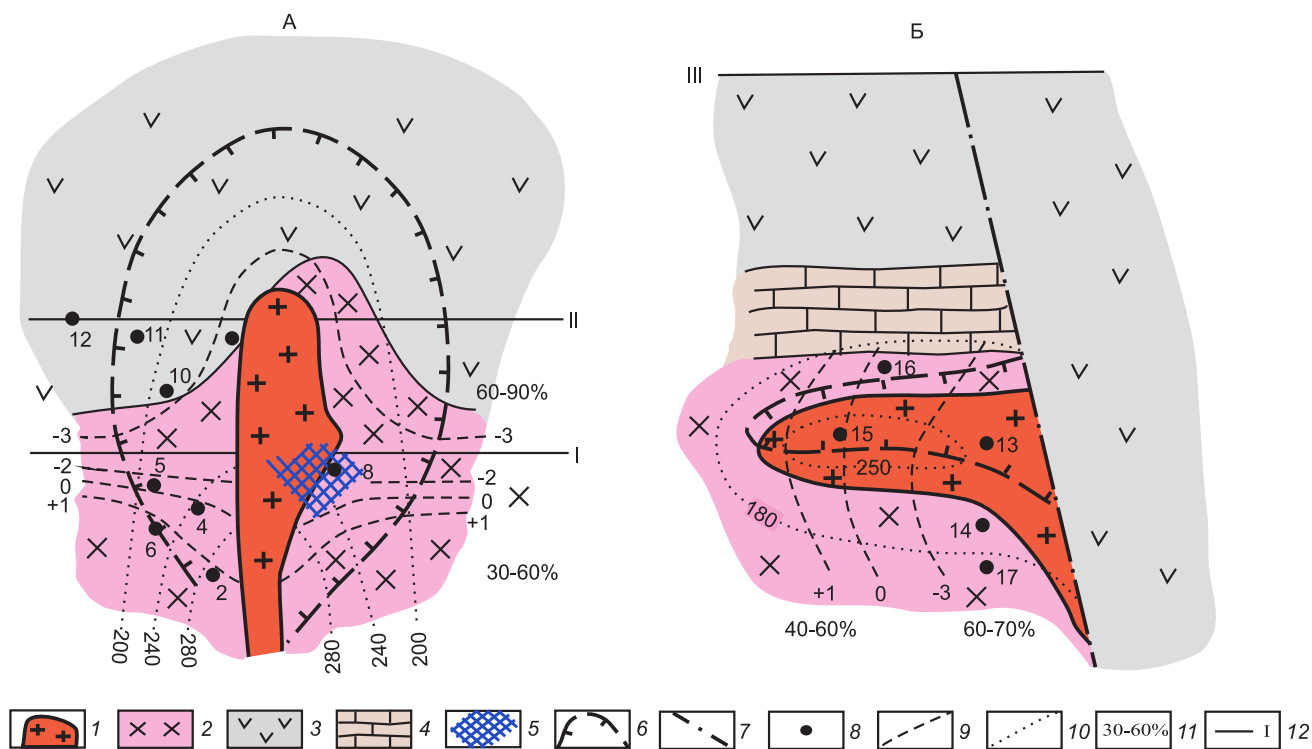


Рис. 19. Модель изотопной зональности медно-порфировых РМС, сформировавшихся в разных структурно-петрофизических обстановках: А – «открытой», Б – «закрытой (подэкранной)» [10]:

1 – рудоносный порфировый интрузив; 2–4 – вмещающие породы: 2 – интрузивные, 3 – вулканические, 4 – карбонатные («экранирующая» толща); 5 – зона интенсивного окварцевания («кварцевое ядро»); 6 – контуры рудных тел; 7 – разлом; 8 – места отбора образцов кварца разновозрастных минеральных ассоциаций; 9 – изолинии расчётных значений  $\delta^{18}\text{O}_{\text{H}_2\text{O}}$  (‰); 10 – изолинии температур декрепитации кварца, °С; 11 – расчётная доля метеорных вод в составе рудообразующих гидротермальных растворов, %; 12 – уровни эрозионного среза месторождений: Актогай (I), Айдарлы (II) и Кызата (III)

района Коллахаузи [27] в Чили) и Северной Америки (Резолюион района Супериор в США [30]), так и рядовые Au-Cu-порфировые месторождения Австралии (E48 и E26 рудного района Норзпарке) [37]. Определение элементного состава хлорита и эпидота современными методами масс-спектропии (LA-ICP-MS, SEM-EDS и WDS) показало, что эти минералы в пропилитовых ореолах МПМ и вмещающих зеленокаменно-изменённых вулканитах различаются содержаниями халькофильных и сидерофильных элементов, что позволяет выявлять пропилитовые ореолы в областях регионального зеленокаменного метаморфизма, повсеместно развитого в ВПП. Причём повышенные содержания As, Sb, Ti, Mn, Zn, Pb, Mg, Co и др. элементов в хлорите и эпидоте фиксируются на площадях, значительно превосходящих эндогенные геохимические ореолы, выявляемые традиционными методами поисковой геохимии по валовому составу пород. По соотношениям содержаний Ti и Sr в эпидоте, Sb и As в хлорите были оценены расстояния до прогнозируемых центров рудообразующих

систем, то есть глубины залегания месторождений, которые затем были сопоставлены с их реальными величинами. В итоге были получены в целом сопоставимые значения, что свидетельствует о возможности использования метода изучения элементов-примесей в минералах-индикаторах для выявления пропилитовых ореолов скрытых месторождений. Следует отметить, что его применение в практике ГРП потребует дорогостоящей аналитической аппаратуры (электронный микроскоп, микрозонд, масс-спектрометры и др.), создания банка данных по фоновым содержаниям микроэлементов в исследуемых минералах, по крайней мере, для металлогенических провинций и зон, а лучше для рудных районов, кроме того, достаточной оснащённости изучаемых территорий либо поверхностных горных выработок и (или) скважин, по которым должны отбираться образцы для анализов.

Несмотря на то, что апробация названных современных геохимических и минералого-геохимических методов была проведена на разведанных, хорошо

разбуренных объектах и до настоящего времени новых МПМ с их помощью не обнаружено, включение таких методов в поисковый комплекс целесообразно, поскольку фонд месторождений, обнаруживаемых традиционными методами ГРР, практически исчерпан.

*Автор глубоко признателен Татьяне Александровне Чуриловой, оказавшей помощь в оформлении иллюстраций.*

### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Ахмедов Н. Н., Голованов И. М., Завьялов Г. Е. и др. Рудные месторождения Узбекистана. – Ташкент: Гидроингео, 2001. – 611 с.
2. Бородаев Ю. С., Еремин Н. И., Мельников Ф. П. и др. Лабораторные методы исследования минералов, руд и пород. – М.: МГУ, 1988. – 296 с.
3. Воларович М. П., Баюк Е. И., Ефимова Г. А. Упругие свойства минералов при высоких давлениях. – М.: Наука, 1975. – 131 с.
4. Гзовский М. В. Основы тектонофизики. – М.: Наука, 1975. – 536 с.
5. Голованов И. М., Николаева Е. И., Кажихин М. А. Комплексная прогнозно-поисковая модель медно-порфировой формации. – Ташкент: ФАН, 1988. – 202 с.
6. Звездов В. С. Механизмы внедрения базитовой магмы в многослойную толщу чехла Восточно-Сибирской платформы и влияние деформационных свойств пород на размещение и морфологию рудоносных трапповых интрузивов (на примере Норильского района) // Отечественная геология. – 2020. – № 3. – С. 47–74.
7. Звездов В. С. Обстановки формирования крупных и сверхкрупных медно-порфировых месторождений // Отечественная геология. – 2019. – № 5. – С. 16–35.
8. Звездов В. С. Строение рудоносных штокверков медно-порфировых месторождений // Геология рудных месторождений. – 1983. – № 3. – С. 17–30.
9. Звездов В. С., Кривцов А. И., Старостин В. И. Структурно-петрофизические условия формирования медно-порфировых месторождений // Геология рудных месторождений. – 1985. – № 5. – С. 3–21.
10. Звездов В. С., Мигачев И. Ф., Гирфанов М. М., Заири Н. М. Обстановки формирования медно-порфировых рудно-магматических систем // Геология рудных месторождений. – 1989. – № 4. – С. 23–37.
11. Звездов В. С., Мигачев И. Ф., Минина О. В. Морфологические типы медно-порфировых штокверков и обстановки их формирования // Руды и металлы. – 2018. – № 4. – С. 37–52.
12. Звездов В. С., Старостин В. И. Петрофизические критерии поисков и оценки медно-порфирового оруденения // Геология и разведка. – 1987. – № 9. – С. 51–59.
13. Звездов В. С., Тихонов В. С. Тепломассоперенос в медно-порфировых рудообразующих системах по данным математического моделирования // Руды и металлы. – 1995. – № 6. – С. 52–57.
14. Колесников В. В., Жуков Н. М., Солодилова В. В., Филимонова Л. Е. и др. Медно-порфировые месторождения. Серия: Балхашский сегмент. – Алма-Ата: Наука, 1986. – 199 с.
15. Кривцов А. И. Геологические основы прогнозирования и поисков медно-порфировых месторождений. – М.: Недра, 1983. – 256 с.
16. Кривцов А. И., Гирфанов М. М., Шишаков В. Б. и др. Комплексные модели месторождений порфирового типа цветных и благородных металлов. Атлас. – М.: ЦНИГРИ, 1995. – 153 с.
17. Кривцов А. И., Звездов В. С., Мигачев И. Ф., Минина О. В. Медно-порфировые месторождения. Сер. Модели месторождений цветных и благородных металлов. – М.: ЦНИГРИ, 2001. – 232 с.
18. Кривцов А. И., Мигачев И. Ф., Минина О. В. Минералого-геохимические типы руд медно-порфировых месторождений – золотоносность и зональность // Геохимия. – 1985. – № 10. – С. 1417–1429.
19. Кривцов А. И., Мигачев И. Ф., Попов В. С. Медно-порфировые месторождения мира. – М.: Недра, 1986. – 236 с.
20. Кривцов А. И., Сергейко Ю. А., Кыдырбеков Л. У., Мигачев И. Ф. и др. Прогрессивные технологии оценки и разведки медно-порфировых месторождений. – Алма-Ата, 1987. – 215 с.
21. Кривцов А. И., Шепелев В. М., Шишаков В. Б. Условия локализации медно-порфирового оруденения на Коксайском месторождении (Ю. Джунгария) // Геология рудных месторождений. – № 5. – 1978. – С. 35–48.
22. Лебедев Т. С., Шаповал В. И., Корчин В. А. и др. Исследование физических свойств минерального вещества Земли при высоких термодинамических параметрах. – Киев: Наукова Думка, 1977. – 220 с.
23. Полетаев А. И., Красников А. М., Мельникова Л. В. и др. Региональная позиция и геология медно-порфирового месторождения Актогай // Геология рудных месторождений. – 1983. – Т. XXV, № 3. – С. 3–16.
24. Старостин В. И. Палеотектонические режимы и механизмы формирования структур рудных месторождений. – М.: Недра, 1988. – 256 с.
25. Туляганов Х. Т., Гарьковец В. Г., Рамазанов М. Р. и др. Медно-порфировые месторождения Алмалыка. – Ташкент: ФАН УзССР, 1974. – 187 с.
26. Физические свойства горных пород и полезных ископаемых (петрофизика) / Справочник геофизика. 2-ое издание // Под ред. Н. Б. Дортман. – М.: Недра, 1984. – 455 с.
27. Baker M. J., Wilkinson J. J., Wilkinson C. C., Cooke D. R. Epidote Trace Element Chemistry as an Exploration Tool in the Collahuasi District, Northern Chile // Econ. Geol. – 2020. – V. 115. – P. 749–770.
28. Cathles L. M. Analyses of cooling of intrusives by ground water convection, which includes boiling // Econ. Geol. – 1977. – V. 12. – P. 804–826.
29. Cook D. R., Hollings P., Walshe J. L. Giant Porphyry Deposits: Characteristics, Distribution, and Tectonic Controls // Econ. Geol. – 2005. – V. 100. – P. 801–818.
30. Cooke D. R., Wilkinson J. J., Baker M. J. et al. Using Mineral Chemistry to Aid Exploration: A Case Study from the Resolution Porphyry Cu-Mo Deposit, Arizona // Econ. Geol. – 2020. – V. 115. – P. 813–840.
31. Eppinger R. G., Fey D. L., Giles S. A. et al. Summary of Exploration Geochemical and Mineralogical Studies at the Giant Pebble Porphyry Cu-Au-Mo Deposit, Alaska: Implications for Exploration Under Cover // Econ. Geol. – 2013. – V. 108. – P. 495–527.
32. 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. – V. 100. – P. 819–833.

33. *Henley R. W., McNabb A.* Magmatic vapor plums and ground-water interaction in porphyry copper emplacement // *Econ. Geol.* – 1978. – V. 73. – P. 1–20.
34. *Lowell J. D., Guilbert J. M.* Lateral and vertical alteration-mineralization zoning in porphyry copper deposits // *Econ. Geol.* – 1970. – V. 65. – P. 373–409.
35. *Norton D. L.* Fluid and heat transport phenomena typical of copper-bearing pluton environments // *Advances in geology of porphyry copper deposits. Southwestern North America. The University of Arizona Press, Tucson.* – 1983. – P. 59–72.
36. *Ossandón G., Fréaut R., Gustafson L. B.* et al. Geology of the Chuquicamata mine: A progress report / *Ossandón, G., Fréaut, R., Gustafson, L. B., Lindsay, D. D., Zentilli M.* // *Econ. Geol.* – 2001. – V. 96. – P. 249–270.
37. *Pacey A., Wilkinson J. J., Cooke D. R.* Chlorite and Epidote Mineral Chemistry in Porphyry Ore Systems: A Case Study of the Northparkes District, New South Wales, Australia // *Econ. Geol.* – 2020. – V. 115. – P. 729–748.
38. *Redmond P. B., Einaudi M. T.* The Bingham Canyon Porphyry Cu-Mo-Au Deposit. I. Sequence of Intrusions, Vein Formation, and Sulfide Deposition // *Econ. Geol.* – 2010. – V. 105. – P. 43–88.
39. *Richards J. P.* A shake-up in the porphyry world? // *Econ. Geol.* – 2019. – V. 113. – P. 1225–1233.
40. *Richards J. P.* Tectono-magmatic precursors for porphyry Cu-(Mo-Au) deposit formation // *Econ. Geol.* – 2003. – V. 98. – P. 1515–1533.
41. *Sillitoe R. H.* Porphyry Copper Systems // *Econ. Geol.* – 2010. – V. 105. – P. 3–41.
42. *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.*
43. *Skarmeta J.* Structural Controls on Alteration Stages at the Chuquicamata Copper-Molybdenum Deposit, Northern Chile // *Econ. Geol.* – 2021. – V. 116. – P. 3–41.
44. *Steinberger I., Hinks D., Driesner T., Heinrich C. A.* 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 // *Econ. Geol.* – 2013. – V. 108. – P. 605–624.
45. *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. – V. 105. – P. 119–153.
46. *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. – V. 112. – P. 591–601.
47. *Wilkinson J. J., Baker M. J., Cooke D. R., Wilkinson C. C.* Exploration Targeting in Porphyry Cu Systems Using Propylitic Mineral Chemistry: A Case Study of the El Teniente Deposit, Chile // *Econ. Geol.* – 2020. – V. 115. – P. 779–791.
2. *Borodayev Yu. S., Yeremin N. I., Melnikov F. P.* et al. *Laboratornyye metody issledovaniya mineralov, rud i porod* [Laboratory methods for the study of minerals, ores and rocks]. Moscow, MGU publ., 1988. 296 p. (In Russ.)
3. *Volarovich M. P., Bayuk Ye. I., Yefimova G. A.* *Uprugiyeh svoystva mineralov pri vysokikh davleniyakh* [Elastic properties of minerals at high pressures]. Moscow, Nauka publ., 1975, 131 p. (In Russ.)
4. *Gzovskiy M. V.* *Osnovy tektonofiziki* [Fundamentals of tectonophysics Moscow, Nauka publ., 1975, 536 p. (In Russ.)
5. *Golovanov I. M., Nikolayeva Ye. I., Kazhikhin M. A.* *Kompleksnaya prognozno-poiskovaya model mednoporfirovoy formatsii* [Complex predictive search model of porphyry copper formation]. Tashkent, FAN publ., 1988, 202 p. (In Russ.)
6. *Zvezdov V. S.* *Mekhanizmy vnedreniya bazitovoy magmy v mnogoslouynuyu tolshchu chekhla Vostochno-Sibirskoy platformy i vliyaniye deformatsionnykh svoystv porod na razmeshcheniye i morfologiyu rudoosnykh trappovykh intruzivov (na primere Noril'skogo rayona)* [Mechanisms of intrusion of basic magma into the multilayer strata of the cover of the East Siberian platform and the influence of deformation properties of rocks on the location and morphology of ore-bearing trap intrusions (by the example of the Norilsk region)]. *Otechestvennaya geologiya*, 2020, No. 3, P. 47–74. (In Russ.)
7. *Zvezdov V. S.* *Obstanovki formirovaniya krupnykh i sverkhkrupnykh mednoporfirovykh mestorozhdeniy* [Formation conditions of large and super-large porphyry copper deposits]. *Otechestvennaya geologiya*, 2019, No. 5, P. 16–35. (In Russ.)
8. *Zvezdov V. S.* *Stroyeniye rudoosnykh shtokverkov mednoporfirovykh mestorozhdeniy* [The structure of ore-bearing stockworks of copper-porphyry deposits]. *Geologiya rudnykh mestorozhdeniy*, 1983, No. 3, P. 17–30. (In Russ.)
9. *Zvezdov V. S., Krivtsov A. I., Starostin V. I.* *Strukturno-petrofizicheskiye usloviya formirovaniya mednoporfirovykh mestorozhdeniy* [Structural and petrophysical conditions for the formation of porphyry copper deposits]. *Geologiya rudnykh mestorozhdeniy*, 1985, No. 5, P. 3–21. (In Russ.)
10. *Zvezdov V. S., Migachev I. F., Girfanov M. M., Zairi N. M.* *Obstanovki formirovaniya medno-porfirovykh rudnomagmatischeskikh sistem* [Formation conditions of porphyry copper ore-magmatic systems]. *Geologiya rudnykh mestorozhdeniy*, 1989, No. 4, P. 23–37. (In Russ.)
11. *Zvezdov V. S., Migachev I. F., Minina O. V.* *Morfologicheskiye tipy medno-porfirovykh shtokverkov i obstanovki ikh formirovaniya* [Morphological types of copper-porphyry stockworks and the setting of their formation]. *Rudy i metally*, 2018, No. 4, P. 37–52. (In Russ.)
12. *Zvezdov V. S., Starostin V. I.* *Petrofizicheskiye kriterii poiskov i otsenki medno-porfirovogo orudneniya* [Petrophysical criteria for prospecting and assessment of porphyry copper mineralization]. *Geologiya i razvedka*, 1987, № 9, S. 51–59. (In Russ.)
13. *Zvezdov V. S., Tikhonov V. S.* *Teplomassoperenos v mednoporfirovykh rudoobrazuyushchikh sistemakh po dannym matematicheskogo modelirovaniya* [Heat and mass transfer in copper-porphyry ore-forming systems according to mathematical modeling]. *Rudy i metally*, 1995, No. 6, P. 52–57. (In Russ.)
14. *Kolesnikov V. V., Zhukov N. M., Solodilova V. V., Filimonova L. Ye.* et al. *Medno-porfirovyye mestorozhdeniya. Seriya: Balkhashskiy segment* [Copper-porphyry deposits. Series: Balkhash segment]. Alma-Ata, Nauka publ., 1986, 199 p. (In Russ.)

## REFERENCES

15. *Krivtsov A. I.* Geologicheskiye osnovy prognozirovaniya i poiskov medno-porfirovykh mestorozhdeniy [Geological foundations of forecasting and prospecting for porphyry copper deposits]. Moscow, Nedra publ., 1983, 256 p. (In Russ.)
16. *Krivtsov A. I., Girfanov M. M., Shishakov V. B.* et al. Kompleksnyye modeli mestorozhdeniy porfirovogo tipa tsvetnykh i blagorodnykh metallov [Complex models of porphyry-type deposits of non-ferrous and noble metals. Atlas]. Moscow, TSNIGRI publ., 1995, 153 p. (In Russ.)
17. *Krivtsov A. I., Zvezdov V. S., Migachev I. F., Minina O. V.* Medno-porfirovyye mestorozhdeniya. Ser. Modeli mestorozhdeniy tsvetnykh i blagorodnykh metallov [Copper-porphyry deposits. Ser. Models of deposits of non-ferrous and precious metals]. Moscow, TSNIGRI publ., 2001, 232 p. (In Russ.)
18. *Krivtsov A. I., Migachev I. F., Minina O. V.* Mineralogiko-geokhimicheskiye tipy rud medno-porfirovykh mestorozhdeniy – zolotonosnost i zonalnost [Mineralogical and geochemical types of ores of porphyry copper deposits-gold content and zoning]. *Geokhimiya*, 1985, No. 10, P. 1417–1429. (In Russ.)
19. *Krivtsov A. I., Migachev I. F., Popov V. S.* Medno-porfirovyye mestorozhdeniya mira [Copper-porphyry deposits of the world]. Moscow, Nedra publ., 1986, 236 p. (In Russ.)
20. *Krivtsov A. I., Sergiyko Yu. A., Kydyrbekov L. U., Migachev I. F.* et al. Progressivnyye tekhnologii otsenki i razvedki medno-porfirovykh mestorozhdeniy [Progressive technologies for the assessment and exploration of porphyry copper deposits]. Alma-Ata, 1987, 215 p. (In Russ.)
21. *Krivtsov A. I., Shepelev V. M., Shishakov V. B.* Usloviya lokalizatsii medno-porfirovogo orudneniya na Koksayskom mestorozhdenii (Yu. Dzhungariya) [Conditions of localization of porphyry copper mineralization at the Koksayskoye deposit (Yu. Dzhungaria)]. *Geologiya rudnykh mestorozhdeniy*, No. 5, 1978, P. 35–48. (In Russ.)
22. *Lebedev T. S., Shapoval V. I., Korchin V. A.* et al. Issledovaniye fizicheskikh svoystv mineralnogo veshchestva Zemli pri vysokikh termodinamicheskikh parametrakh [Investigation of the physical properties of the Earth's mineral matter at high thermodynamic parameters]. Kiyev, Naukova Dumka publ., 1977, 220 p. (In Russ.)
23. *Poletayev A. I., Krasnikov A. M., Melnikova L. V.* et al. Regionalnaya pozitsiya i geologiya medno-porfirovogo mestorozhdeniya Aktogay [Regional position and geology of the porphyry copper deposit Aktogay]. *Geologiya rudnykh mestorozhdeniy*, 1983, V. XXV, No. 3, P. 3–16. (In Russ.)
24. *Starostin V. I.* Paleotektonicheskiye rezhimy i mekhanizmy formirovaniya struktur rudnykh mestorozhdeniy [Paleotectonic regimes and mechanisms of formation of structures of ore deposits]. Moscow, Nedra publ., 1988, 256 p. (In Russ.)
25. *Tulyaganov Kh. T., Garkovets V. G., Ramazanov M. R.* et al. Medno-porfirovyye mestorozhdeniya Almalyk [Copper-porphyry deposits of Almalyk]. Tashkent, FAN UzSSR publ., 1974, 187 p. (In Russ.)
26. *Fizicheskiye svoystva gornnykh porod i poleznykh iskopayemykh (petrofizika)* [Physical properties of rocks and minerals (petrophysics)]. *Spravochnik geofizika*. 2-oye izdaniye, Pod red. N. B. Dortman, M.: Nedra, 1984, 455 p. (In Russ.)
27. *Baker M. J., Wilkinson J. J., Wilkinson C. C., Cooke D. R.* Epidote Trace Element Chemistry as an Exploration Tool in the Collahuasi District, Northern Chile. *Econ. Geol.*, 2020, V. 115, P. 749–770.
28. *Cathles L. M.* Analyses of cooling of intrusives by ground water convection, which includes boiling. *Econ. Geol.*, 1977, V. 12, P. 804–826.
29. *Cook D. R., Hollings P., Walshe J. L.* Giant Porphyry Deposits: Characteristics, Distribution, and Tectonic Controls. *Econ. Geol.*, 2005, V. 100, P. 801–818.
30. *Cooke D. R., Wilkinson J. J., Baker M. J.* et al. Using Mineral Chemistry to Aid Exploration: A Case Study from the Resolution Porphyry Cu-Mo Deposit, Arizona. *Econ. Geol.*, 2020, V. 115, P. 813–840.
31. *Eppinger R. G., Fey D. L., Giles S. A.* et al. Summary of Exploration Geochemical and Mineralogical Studies at the Giant Pebble Porphyry Cu-Au-Mo Deposit, Alaska: Implications for Exploration Under Cover. *Econ. Geol.*, 2013, V. 108, P. 495–527.
32. *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, V. 100, P. 819–833.
33. *Henley R. W., McNabb A.* Magmatic vapor plums and ground-water interaction in porphyry copper emplacement. *Econ. Geol.*, 1978, V. 73, P. 1–20.
34. *Lowell J. D., Guilbert J. M.* Lateral and vertical alteration-mineralization zoning in porphyry copper deposits. *Econ. Geol.*, 1970, V. 65, P. 373–409.
35. *Norton D. L.* Fluid and heat transport phenomena typical of copper-bearing pluton environments. *Advances in geology of porphyry copper deposits. Southwestern North America. The University of Arizona Press, Tucson*, 1983, P. 59–72.
36. *Ossandón G., Fréret R., Gustafson L. B.* et al. Geology of the Chuquicamata mine: A progress report / Ossandón, G., Fréret, R., Gustafson, L.B., Lindsay, D.D., Zentilli M. *Econ. Geol.*, 2001, V. 96, P. 249–270.
37. *Pacey A., Wilkinson J. J., Cooke D. R.* Chlorite and Epidote Mineral Chemistry in Porphyry Ore Systems: A Case Study of the Northparkes District, New South Wales, Australia. *Econ. Geol.*, 2020, V. 115, P. 729–748.
38. *Redmond P. B., Einaudi M. T.* The Bingham Canyon Porphyry Cu-Mo-Au Deposit. I. Sequence of Intrusions, Vein Formation, and Sulfide Deposition. *Econ. Geol.*, 2010, V. 105, P. 43–88.
39. *Richards J. P.* A shake-up in the porphyry world. *Econ. Geol.*, 2019, V. 113, P. 1225–1233.
40. *Richards J. P.* Tectono-magmatic precursors for porphyry Cu-(Mo-Au) deposit formation. *Econ. Geol.*, 2003, V. 98, P. 1515–1533.
41. *Sillitoe R. H.* Porphyry Copper Systems. *Econ. Geol.*, 2010, V. 105, P. 3–41
42. *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.
43. *Skarmeta J.* Structural Controls on Alteration Stages at the Chuquicamata Copper-Molybdenum Deposit, Northern Chile. *Econ. Geol.*, 2021, V. 116, P. 3–41.
44. *Steinberger I., Hinks D., Driesner T., Heinrich C. A.* 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. *Econ. Geol.*, 2013, V. 108, P. 605–624.
45. *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, V. 105, P. 119–153.
46. *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, V. 112, P. 591–601.
47. *Wilkinson J. J., Baker M. J., Cooke D. R., Wilkinson C. C.* Exploration Targeting in Porphyry Cu Systems Using Pro-pylitic Mineral Chemistry: A Case Study of the El Teniente Deposit, Chile. *Econ. Geol.* 2020, V. 115, P. 779–791.