

На правах рукописи



ЗВЕЗДОВ Вадим Станиславович

**МОДЕЛИ МЕДНОПОРФИРОВЫХ РУДНО-МАГМАТИЧЕСКИХ
СИСТЕМ И МЕСТОРОЖДЕНИЙ ДЛЯ ПРОГНОЗА,
ПОИСКОВ И ОЦЕНКИ**

Специальность: 1.6.10 — геология, поиски и разведка твердых
полезных ископаемых, минерагения

АВТОРЕФЕРАТ
диссертации на соискание ученой степени
доктора геолого-минералогических наук

Москва — 2022

Работа выполнена в Федеральном государственном бюджетном учреждении «Центральный научно-исследовательский геологоразведочный институт цветных и благородных металлов» (ФГБУ «ЦНИГРИ»)

Официальные оппоненты: **Кременецкий Александр Александрович**, доктор геолого-минералогических наук, профессор, ФГБУ «Институт минералогии, геохимии и кристаллохимии редких элементов» (ИМГРЭ)», научный руководитель

Макаров Владимир Александрович, доктор геолого-минералогических наук, профессор, ФГАОУ ВО «Сибирский Федеральный Университет», Институт горного дела, геологии и геотехнологий (ИГДГиГ) СФУ, директор, кафедра геологии месторождений и методики разведки МПИ, зав. кафедрой

Дамдинов Булат Батуевич, доктор геолого-минералогических наук, ФГБУН Геологический институт им. Н.Л.Добрецова Сибирского Отделения Российской академии наук (ГИН СО РАН), заместитель директора по научной работе

Ведущая организация: Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Московский Государственный Университет им. М.В.Ломоносова», Геологический факультет. Кафедра геологии, геохимии и экономики полезных ископаемых

Защита состоится 17 ноября 2022 г. в 11 часов 00 минут на заседании Диссертационного совета 30.1.001.01 (Д 216.022.01), созданного на базе Федерального государственного бюджетного учреждения «Центральный научно-исследовательский геологоразведочный институт цветных и благородных металлов» (ФГБУ «ЦНИГРИ»)

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

С диссертацией можно ознакомиться в читальном зале научно-технической библиотеки ФГБУ «ЦНИГРИ» (по адресу: г. Москва, Варшавское шоссе, д. 129, корп. 1) и на сайте Федерального государственного бюджетного учреждения «Центральный научно-исследовательский геологоразведочный институт цветных и благородных металлов»:

<http://www.tsnigri.ru/ru/zvezdov>

http://www.tsnigri.ru/disser/zvezdov/Zvezdov_V_S_DIS.pdf

Автореферат разослан « » сентября 2022 г.

Ученый секретарь Диссертационного совета



С.С.Двуреченская

ВВЕДЕНИЕ

Актуальность работы

Меднопорфировые месторождения (МПМ) являются ведущими в мире по запасам и добыче Cu и Mo, а также сопутствующих Au, Ag, Re. Среди них наибольшее количество объектов «мирового класса» – гигантских (>10 млн. т Cu) и супергигантских (>25 млн. т Cu), в т.ч. самые крупные из известных чилийские месторождения Чукикамата и Эль Теньенте с запасами Cu более 100 млн. т каждое. По геологическому строению вулканоплутонические пояса (ВПП) России имеют сходство с поясами Северной и Южной Америки, Азиатско-Тихоокеанского региона, где сосредоточены сотни МПМ, включая десятки крупных и сверхкрупных. Однако, к настоящему времени на Государственном балансе запасов ПИ страны, несмотря на многолетние поиски, всего лишь 6 месторождений названного геолого-промышленного типа (ГПТ): Песчанка (Чукотский АО), Малмыжское (Хабаровский край), Ак-Сугское (Республика Тыва), Иканское (Амурская область), Михеевское и Томинское (Челябинская область), первые три из которых можно отнести к классу крупных.

Промышленное освоение МПМ требует значительных инвестиций из-за больших запасов руды (сотни млн. – млрд. т) при сравнительно невысоких содержаниях металлов. Поэтому поискам крупных объектов, отработка которых была бы экономически целесообразна, в СССР и постсоветской России всегда уделялось особое внимание. Проблема актуальна и в настоящее время, поскольку основными перспективами для обнаружения новых месторождений обладают восточные регионы страны с недостаточно развитой инфраструктурой. Одним из направлений ее решения является совершенствование геолого-генетических основ прогнозирования, с учетом которых построены прогнозно-поисковые модели рудных районов и полей, с целью модернизации методов и технологий прогноза, поисков и оценки месторождений и, прежде всего, скрытых, т.е. не выходящих на дневную поверхность, что возможно лишь с привлечением количественных параметров описания гидротермальных рудообразующих систем и процессов рудонакопления.

Состояние проблемы

Разработки в названном направлении проводились, как в СССР и России, так и за рубежом. Проблеме посвящены многочисленные отечественные и зарубежные монографии и статьи, включая изданные в ЦНИГРИ, в которых рассмотрены геотектонические обстановки формирования МПМ, протрастивно-временные и генетические связи с определенными плутоногенными формациями и месторождениями других формационных типов, рудно-метасоматическая зональность и вещественный состав руд, термодинамические и физико-химические условия рудообразования, возможные источники гидротермальных растворов и металлов и другие вопросы, связанные с происхождением этих объектов, принципами и методологией их прогноза, поисков и оценки.

Мировая практика геологоразведочных работ последних десятилетий в странах Ю.Аmericи (Чили, Перу, Аргентина, Боливия), Европы (Венгрия, Сербия, Болгария), Азии (Узбекистан, Турция, КНР), ЮВ Азии (Филиппины, Папуа – Новая Гвинея, Индонезия) свидетельствует о парагенетической связи меднопорфировых месторождений с проявлениями мезотермальных скарновых, жильных и штокверковых, а также эпитеpmальных стратоидных и жильно-прожилковых руд полиметаллов, золота и серебра. В ВПП эти объекты нередко сопряжены в объеме единых меднопорфировых руд-

но-магматических систем (МП РМС), часто называемых также «комплексными», «порфировыми» или «порфирово-эпитермальными». Меднопорфировые объекты, как правило, сосредоточены во внутренних (стержневых) частях таких систем, мезотермальные – на флангах, а эпитермальные в их верхних периферийных областях, иногда на значительном удалении (до первых км).

На территории РФ известны около двух десятков мелких непромышленных месторождений и значительное количество рудопроявлений меднопорфирового типа, многие из которых должным образом не оценены. Кроме того, имеется множество жильных и штокверковых золото-полисульфидных, золото-кварцевых, золото-серебряных, скарновых медных и полиметаллических месторождений и проявлений, часть из которых может принадлежать фланговым либо верхним частям слабо эродированных комплексных МП РМС. Исходя из мирового опыта, отраженного в публикациях А.И.Кривцова, И.Ф.Мигачева, В.А.Коваленкера, В.С. Попова, Г.Корбе, Т.Лича, Ф.Молнара, М.Рейса, Р.Силлитоу, Дж.Хеденквиста и других исследователей, во внутренних зонах таких систем могут прогнозироваться меднопорфировые руды. В совокупности все это позволяет в целом позитивно оценивать перспективы обнаружения новых меднопорфировых месторождений на территории Российской Федерации.

Цель исследований – совершенствование геолого-генетических моделей меднопорфировых рудно-магматических систем и месторождений, являющихся основой прогнозно-поисковых моделей рудных районов (узлов) и полей, с целью модернизации методов и технологий прогноза, поисков и оценки новых месторождений, включая скрытые, т.е. не выходящие на дневную поверхность.

Основные задачи исследований

1. Выявить различия рудно-формационной зональности меднопорфировых рудно-магматических систем базальтоидных и андезитоидных вулканоплутонических поясов и оценить возможность их использования в прогнозных целях.

2. Установить факторы, способствовавшие формированию крупных и особо крупных меднопорфировых месторождений, определить критерии их прогноза и поисков.

3. Оценить влияние физико-механических свойств вмещающих пород на морфологию рудоносных порфировых интрузивов, форму и строение сопряженных с ними рудных штокверков, уровни концентрации металлов в рудах и запасы месторождений. Определить возможность использования петрофизических параметров для оконтуривания минерализованных зон.

4. Сопоставить существующие концепции генезиса меднопорфировых месторождений на основе анализа их рудно-метасоматической и изотопно-геохимической зональности, распределения и баланса содержаний меди в гидротермальных рудообразующих системах, моделирования концентрационных потоков в их объеме и расчетов тепломассопереноса.

5. Разработать прогнозно-поисковые модели меднопорфировых рудных районов и узлов применительно к вулканоплутоническим поясам восточных регионов России, провести на их основе прогнозно-металлогенетическое районирование территории с выделением площадей, перспективных для поисков новых месторождений с ранжированием по рекомендуемой очередности постановки ГРП различного масштаба.

Фактический материал, методы исследований, личный вклад автора

В основу работы положены фактические материалы, полученные автором в ходе

многoletних исследований (1975 – 2022 гг.) в рамках выполнения ряда госбюджетных тем. Среди них:

- результаты изучения геолого-структурных условий локализации, рудно-метасоматической зональности, минералого-геохимических особенностей руд и петрофизических характеристик ряда меднопорфировых месторождений и рудопроявлений России, Казахстана, Узбекистана;

- результаты проведенных в последнем десятилетии XX века под руководством А.И.Кривцова работ по моделированию месторождений алмазов, благородных и цветных металлов (АБЦМ) ведущих рудно-формационных и геолого-промышленных типов, в которых автор занимался построением геолого-промышленных (статистических), количественных прогнозно-поисковых (параметрических), концентрационных градиентно-векторных и геолого-генетических моделей месторождений меднопорфирового семейства;

- данные проведенного автором анализа отечественных и зарубежных публикаций по геотектонической позиции, геологии, генезису и методам прогноза, поисков и оценки меднопорфировых и сопряженных с ними месторождений цветных и благородных металлов за несколько десятилетий;

- материалы прогнозно-металлогенических и поисковых исследований по оценке ресурсного потенциала территории РФ, ее регионов и отдельных перспективных площадей на меднопорфировые и сопряженные руды цветных и благородных металлов с составлением разномасштабных специализированных прогнозных (с «ГИС-привязанными» электронными каталогами объектов) и геологических карт, в которых автор являлся ответственным исполнителем или руководителем работ по проектам; среди них: прогнозно-минерагеническая карта ВПП восточных регионов России масштаба 1:2 500 000 с картами-врезками Кавральянской, Хетачано-Кричальской и Северо-Сихотэ-Алиньской металлогенических зон (МЗ) масштаба 1:500 000; прогнозно-металлогеническая карта Магаданской области масштаба 1:1 000 000 с картой-врезкой Омулёвской МЗ масштаба 1:200 000; прогнозные карты масштаба 1:500 000: Камчатского края, Войкарской (Малоуральской) МЗ Ауэрбаховско-Новогодненского ВПП, Ланковско-Тауйской МЗ Охотско-Чукотского, Октябрьской МЗ Умлекано-Огоджинского и другие.

При изучении рудных полей и месторождений использовался традиционный комплекс методов, включавший: полевые работы (крупномасштабное геологическое картирование, специализированную минералого-петрографическую документацию бортов Кальмакырского карьера и керна скважин, отбор проб на различные виды анализов); лабораторно-аналитическое изучение каменного материала (микроскопическое шлифов и аншлифов; силикатный химический, спектральный, атомно-абсорбционный, пробирный и др. анализы, выполненные в лабораториях ЦНИГРИ и других организаций); интерпретацию полученных данных с построением геологических карт и разрезов изученных объектов, таблиц, графиков и диаграмм. В дополнении к этому комплексу при исследованиях месторождений Алмалыкского, Коксайского, Саукбулакского и Актогайского рудных полей был использован модифицированный автором метод оценки минерализованной трещиноватости, позволивший расшифровать внутреннее строение рудных штоков, а также петрофизический анализ рудовмещающих сред. Экспериментальное определение физико-механических свойств пород и руд выполнено лично автором в рудно-петрофизической лаборатории кафедры полезных ископаемых МГУ по

методике В.И.Старостина; петрофизические параметры рассчитаны с использованием компьютерных программ С.А.Сандомирского и Н.Н.Шатагина.

Прогнозно-металлогеническое районирование восточных регионов России на меднопорфировые и сопряженные руды цветных и благородных металлов проведено с использованием методических приемов, подробно описанных в монографии «Меднопорфировые месторождения» (2001 г.) и методическом руководстве по оценке прогнозных ресурсов (2002 г.), составленных при участии автора.

Основные защищаемые положения

1. В семействе меднопорфировых месторождений выделены две формационные группы, свойственные базальтоидным и андезитоидным вулканоплутоническим поясам (ВПП). Различия в строении и составе субстрата этих поясов отражаются не только в петрологии рудоносных плутогенных формаций, рудно-метасоматической зональности месторождений, запасах и содержаниях Cu, Mo, Au и Ag в рудах, но в вертикально-латеральной рудно-формационной зональности рудно-магматических систем (РМС), во внутренних (стержневых) частях которых эти месторождения локализованы. Комплексная металлогения, т.е. сочетание месторождений разных типов в объеме таких систем, предопределяется составом и степенью дифференциации магматических очагов.

Для РМС андезитоидных ВПП характерно пространственное совмещение рудных объектов, сформированных на разных этапах развития поясов, и месторождений их фундамента.

2. Меднопорфировые месторождения «мирового класса» формировались в отдельных сегментах андезитоидных и базальтоидных ВПП, на ранних этапах развития которых преобладал режим интенсивного коллизионного сжатия, подавлявший вулканизм и приводивший к возникновению мощных флюидонасыщенных магматических очагов в верхней части земной коры. Необходимым условием для рудонакопления в значительных масштабах в период разгрузки этих очагов была петрофизическая неоднородность геологических разрезов, а именно наличие над рудоносными интрузивами малопроницаемых толщ, способствовавших концентрированию металлов. Благоприятную роль играли карбонатные либо богатые железом мафические вмещающие породы, являвшиеся геохимическими барьерами для гидротермальных растворов и приводившие к отложению высокосортовых руд, а также рудное вещество геохимических аномалий и месторождений субстрата андезитоидных ВПП, подвергнувшихся регенерации в тепловом поле плутонов.

Сформировавшиеся в подобных обстановках объекты выделяются повышенными содержаниями металлов в рудах, отражающими совмещение в пространстве продуктов многостадийного магматизма и рудогенеза.

3. Деформационное поведение пород при внедрении магмы и их фильтрационные свойства влияли на морфологию порфировых интрузивов, форму и строение сопряженных с ними рудоносных штокверков, уровни концентрации металлов в рудах и запасы месторождений, что необходимо учитывать при их поисках и оценке. Основными механизмами возникновения рудовмещающих структур были гидроразрыв и контракция при охлаждении, кристаллизации и дефлюидизации рудоносных магматических тел, приводившие к образованию трещин в их апикальных частях, а также в породах кровли с раскрытием более древних нарушений. Масштабы проявления этих процессов зависели от петрофизических характеристик вмещающих сред.

Метасоматические преобразования пород сопровождалось значительными изменениями их физико-механических свойств. Установление направленности и масштабов этих изменений может быть использовано для оконтуривания минерализованных зон.

4. Строение и параметры РМС, пространственно-временная эволюция гидротермальных потоков в их объеме, расшифрованные с помощью градиентно-векторных концентрационных моделей рудных тел и геохимических ореолов, свидетельствуют о том, что условия формирования меднопорфировых месторождений наиболее полно (количественно) могут быть описаны *смешанно-флюидной конвективно-рециклинговой геолого-генетической моделью*. Она предполагает двойственную природу транспортирующих агентов (флюидов, растворов) и рудного вещества – магматогенную (мантийную и коровую) и инфильтрационную (метеорную), а в качестве «проводников» тепла и металлоносных флюидов от «материнских» магматических очагов – порфировые интрузивы и брекчиевые трубки. Многооборотная циркуляция гидротермальных растворов, возникавшая в тепловом поле интрузивов на средних и поздних стадиях развития РМС, приводила к частичному перераспределению металлов.

5. Комплексные меднопорфировые РМС по масштабам эквивалентны рудным районам и узлам. Их внутренние и фланговые части с собственно меднопорфировыми, скарновыми и жильными месторождениями меди, полиметаллов, золота, серебра, а также внешние с эпитермальными стратойдными, жильными и жильно-прожилковыми золоторудными и золото-серебряными месторождениями могут рассматриваться как рудные поля. Закономерное расположение разнотипных продуктов рудогенеза в объеме таких РМС допускает возможность прогноза их недостающих элементов при наличии любого из них, что учтено в разработанных прогнозно-поисковых моделях потенциальных рудных районов (ППР) и узлов (ПРУ). На их основе проведено прогнозно-металлогеническое районирование восточных регионов России. В металлогенических зонах ряда минерагенических провинций выделены и оконтурены ППР и ПРУ, оценена их перспективность на меднопорфировые и сопряженные руды.

Научная новизна

1. Предложено разделение месторождений меднопорфирового семейства на две формационные группы, принадлежащие базальтоидным и андезитойдным ВПП. Показано, что различия в строении и составе фундамента этих поясов отражаются не только в петрологии рудоносных плутогенных формаций, рудно-метасоматической зональности месторождений, запасах и содержаниях Cu, Mo, Au и Ag в рудах, что отмечалось ранее многими исследователями, но в рудно-формационной зональности рудно-магматических систем (РМС), во внутренних частях которых эти месторождения локализованы. Установленные различия в сочетаниях (наборе) месторождений и проявлений разных рудно-формационных типов (РФТ) в комплексных РМС названных поясов должны учитываться при прогнозных построениях.

2. Показано, что для формирования гигантских и супергигантских меднопорфировых месторождений необходимы не только мощные, неглубоко залегающие, флюидонасыщенные магматические очаги, возникавшие в отдельных сегментах магматических дуг (ВПП) в режиме интенсивного коллизионного сжатия с подавлением вулканизма, что уже было отмечено в работах Д.Кука, П.Холлинса, Дж.Уолша, Дж.Ричардса, Р.Силлитоу, но и благоприятные структурно-петрофизические обстановки разгрузки этих очагов в период инверсии тектонических

напряжений при орогенезе, в частности наличие над рудоносными интрузивами малопроницаемых («экранировавших») толщ «упруго-пластичного» либо «упруго-вязкого» деформационного типа. В противном случае, формируются мелкие объекты либо геохимические ореолы без промышленных концентраций металлов.

3. С использованием модифицированного автором метода оценки объемов минерализованной трещиноватости и петрофизического анализа рудовмещающих толщ, впервые примененных к МПМ Средней Азии и Казахстана, установлено, что деформационная природа вмещающих пород влияла на морфологию порфировых интрузивов, форму, строение и тенденции развития в пространстве сопряженных с ними рудоносных штокверков, механизмы возникновения рудовмещающих трещинных каркасов, и, в конечном итоге, на содержания металлов в рудах и запасы месторождений, что необходимо учитывать при их поисках и оценке. Для объектов разных структурно-петрофизических обстановок локализации оценены направленность и масштабы изменения емкостных (фильтрационных) и упруго-прочностных свойств вмещающих пород в ходе околорудных метасоматических преобразований. Параметры этих свойств и рассчитанные по ним значения комплексных коэффициентов могут использоваться при оконтуривании минерализованных зон.

4. С применением градиентно-векторного анализа распределения концентраций меди в рудных телах и геохимических ореолах ряда разнотипных МПМ, построена модель меднопорфировой конвективно-рециклинговой рудообразующей системы (МП КРРС), в которой описана ее геометрия, структура и количественные параметры. В комплексе с моделями рудно-метасоматической и изотопно-геохимической зональности МПМ, расчетами баланса вещества и математического моделирования теплопереноса, а также данными по природным высокотемпературным геотермальным резервуарам, эта модель количественно обосновывает возможность участия метеорных вод, активизированных в тепловом поле интрузивов, в перетолжении рудного вещества, заимствованного из вмещающих пород (фанеритовых фаз плутонов и интрузивной рамы).

5. Предложено рассматривать комплексные меднопорфировые РМС в качестве рудных районов (узлов), а их внутренние и фланговые части с собственно меднопорфировыми, скарновыми и мезотермальными месторождениями меди, полиметаллов, золота, серебра и внешние периферийные с эпитермальными золоторудными и золото-серебряными месторождениями, а также самородной серы, как рудные поля. Для ВПП восточных регионов России выделены три основных типа таких систем – на сочленении выступов фундамента поясов с вулcano-тектоническими палеодепрессиями, в магматогенных палеоподнятиях фундамента и вулcano-купольных структурах, различия в строении и рудно-формационной зональности которых должны учитываться при поисках меднопорфировых и сопряженных руд. Для названных разнотипных систем построены прогнозно-поисковые модели, на основе которых в ряде металлогенических зон изученных поясов оконтурены и оценены по перспективности потенциальные меднопорфировые рудные районы и узлы.

Практическая значимость

Элементы описанных в работе моделей меднопорфировых систем и месторождений – классификационно-признаковых, геолого-промышленных статистических, структурно-петрофизических, градиентно-векторных, количественных геолого-генетических – могут быть применены для совершенствования прогнозно-поисковых моделей руд-

ных районов, узлов и полей, что необходимо для обнаружения и оценки новых, в т.ч. скрытых (не выходящих на дневную поверхность) месторождений.

Разработанные для ВПП восточных регионов России прогнозно-поисковые модели комплексных меднопорфировых РМС (потенциальных рудных районов и узлов) использованы при прогнозно-металлогеническом районировании территории ДФО, по результатам которого составлена серия вышеперечисленных специализированных (на меднопорфировое и сопряженное оруденение) цифровых карт с «ГИС-привязанными» электронными каталогами месторождений и рудопроявлений цветных и благородных металлов, принадлежащих таким системам.

На этих картах оконтурены разноранговые минерагенические таксоны – металлогенические зоны, рудные районы и узлы, перспективные для поисков новых меднопорфировых и сопряженных с ними мезотермальных и эпитеpmальных месторождений других РФТ. Выделенные площади ранжированы по степени перспективности и рекомендуемой очередности постановки ГРР различного масштаба. Подготовленные рекомендации использованы Роснедра при оперативном и среднесрочном планировании ГРР за счет федерального бюджета. На многих из рекомендованных площадей проведены поисковые работы с оценкой прогнозных ресурсов меди и сопутствующих компонентов руд; на некоторых они проводятся в настоящее время (Мечивеевская и Шхиперовская площади в Магаданской области).

Разработанные методики оценки жильно-прожилковой массы разновозрастных минеральных ассоциаций в объеме меднопорфировых штокверков и петрофизических исследований могут быть использованы для предварительного оконтуривания минерализованных зон, а также прогнозирования их возможных форм и параметров. Очевидно, что эффективное их применение возможно лишь при комплексировании с традиционными и инновационными (геофизическими, минералого-геохимическими, изотопно-геохимическими и др.) поисковыми методами и технологиями.

Степень достоверности и апробация результатов

Достоверность материалов, положенных в основу диссертационной работы, обеспечена:

- значительным объемом проанализированных автором отечественных и зарубежных публикаций (более 300) и фондовых работ по закономерностям размещения, геологии и генезису меднопорфировых и сопряженных с ними месторождений, а также методам и технологиям их прогноза, поисков и оценки;

- проведенными исследованиями разнотипных меднопорфировых месторождений России, Казахстана и Узбекистана, включавшими: крупномасштабное геологическое картирование рудных полей и участков месторождений; детальную минералогическую петрографическую документацию керна скважин, микроскопическое изучение шлифов (около 850) и аншлифов (430); аналитические работы (полный силикатный, спектральный полуколичественный, атомно-абсорбционный, пробирный и другие виды анализов);

- данными изучения строения рудоносных штокверков и физико-механических свойств вмещающих пород (524 пробы) шести месторождений: Кальмакырского (в карьере), Дальнего, Северо-Западный Балыкты, Кызата (Узбекистан), Коксайского и Актогайского (Казахстан) – по разведочным скважинам (глубиной от 500 до 1200 м, в среднем 650-700 м) по 8 опорным профилям (по 5–8 скважин в каждом);

- разномасштабными картами и разрезами, составленными по результатам работ.

Результаты выполненных комплексных исследований использованы при написании многочисленных отчетов по госбюджетным темам, прошедших апробацию в установленном порядке в различных структурных подразделениях Мингео СССР, Минприроды РФ и Роснедра.

Основные результаты и положения работы представлялись и докладывались на научных и научно-практических конференциях в ЦНИГРИ (1985-2022 гг.), ВСЕГЕИ (2011), ИГЕМ (1980, 2010), ИГГ (1985), ДВИМС (1988), ДВГИ (1985), МГУ (1978, 1979, 1982), РГГУ (2009, 2019), РУДН (2011), Геовебинар (2020), а также «Бекжановских чтениях» в ИГН (Алматы, Казахстан, 2019), 7-ом Симпозиуме МАГРМ (Лулео, Швеция, 1986), XXVIII сессии МГК (Вашингтон, США, 1989), Международной конференции «Математическое моделирование в геологии» (Прага, Чехия, 1997), XXXIV сессии МГК (Брисбейн, Австралия, 2012).

Публикации

По теме диссертации автором опубликовано 67 работ (43 в соавторстве), в том числе 2 монографии и 40 статей, из них 21 в журналах, включенных в Перечень ВАК.

Структура и объем диссертации

Диссертация общим объемом 553 стр. (в 2-х томах) состоит из введения, пяти глав, заключения, 173 рис., 31 таблицы, списка литературы из 383 источников.

Благодарности

Диссертационная работа подготовлена в стенах ЦНИГРИ при всесторонней поддержке руководства и ведущих специалистов института – А.И.Кривцова, И.Ф.Мигачева, А.И.Иванова, Б.К.Михайлова, А.И.Черных, О.В.Мининой, С.Г.Кряжева.

В исследованиях меднопорфировых месторождений Казахстана и Узбекистана вместе с автором участвовали В.Н.Буров, М.М.Гирфанов, В.М.Шепелев, месторождений России – А.Г.Волчков, В.Е.Васюков, В.В.Столяренко, Д.А.Шумилин. Возможность изучения месторождений была предоставлена руководством и геологами Алмалыкской ГРЭ и Алмалыкского ГМК, Джунгарской ГРЭ, Актогайской ГРП, Центрально-Камчатской и Северо-Камчатской ГРЭ и других производственных организаций.

Физико-механические свойства пород и руд исследованы автором на кафедре полезных ископаемых МГУ при консультациях В.И.Старостина, С.А.Сандомирского и Н.Н.Шатагина. Их вещественный состав и изотопно-геохимические характеристики определены специалистами отделов минералогии и изотопной геохимии, обогащения минерального сырья и аналитических исследований ЦНИГРИ Н.М.Заири, Ю.В.Васютой, В.Н.Гушиным, С.Г.Кудрявцевым, А.И.Романчуком, А.В.Мандругиным и другими.

Подготовка ГИС-проектов разномасштабных прогнозных карт осуществлена сотрудниками отделов ЦНИГРИ: цветных металлов – В.В.Кузнецовым, С.Л.Елшиной, Е.В.Иваненковой; геоинформационных систем – А.М.Вахрушевым, С.В.Федоренко.

Техническое оформление работы проведено Т.А.Чуриловой. Существенную помощь также оказал О.А.Агибалов.

Всем упомянутым специалистам и коллегам автор искренне признателен за помощь.

Особую благодарность и уважение автор выражает А.И.Кривцову, И.Ф.Мигачеву и О.В.Мининой за годы совместной увлекательной научной работы, а также А.И.Иванову за консультации и внимание, без которых написание представляемой работы было бы невозможно.

Раздел 1. МОДЕЛИ МЕДНОПОРФИРОВЫХ РУДНО-МАГМАТИЧЕСКИХ СИСТЕМ И МЕСТОРОЖДЕНИЙ

Первое защищаемое положение. В семействе меднопорфировых месторождений выделены две формационные группы, свойственные базальтоидным и андезитоидным вулканоплутоническим поясам (ВПП). Различия в строении и составе субстрата этих поясов отражаются не только в петрологии рудоносных плутоногенных формаций, рудно-метасоматической зональности месторождений, запасах и содержаниях Cu, Mo, Au и Ag в рудах, но в вертикально-латеральной рудно-формационной зональности рудно-магматических систем (РМС), во внутренних (стержневых) частях которых эти месторождения локализованы. Комплексная металлогения, т.е. сочетание месторождений разных типов в объеме таких систем, предопределяется составом и степенью дифференциации магматических очагов.

Для РМС андезитоидных ВПП характерно пространственное совмещение рудных объектов, сформированных на разных этапах развития поясов, и месторождений их фундамента.

В первом разделе диссертации кратко рассмотрены геотектоническая позиция, существующие классификации и геолого-генетические характеристики месторождений меднопорфирового семейства, описанные в работах А.И.Кривцова, И.Ф.Мигачева, О.В.Мининой, И.Г.Павловой, В.А.Перваго, В.С.Попова, Р.Бина, А.Катро, К.Кларка, Дж.Лоуэлла, Дж.Джилберта, Д.Кука, А.Сазерленда-Брауна, Р.Силлитоу, С.Титли, В.Холлистера и др. Показано, что эти объекты сосредоточены в ВПП двух типов: *базальтоидных (островодужных и рифтогенных)* и *андезитоидных (окраинно- и внутриконтинентальных)*. Состав и металлогенная специализация рудоносных известково-щелочных вулканоплутонических ассоциаций (ВПА), участвующих в строении этих поясов, предопределяются «материнскими» магматическими очагами в океанической и континентальной земной коре (ЗК). Различия в составе, степени дифференциации и металлоносности очагов отражаются в петрологии ВПА, метасоматической зональности и минералого-геохимических особенностях руд МПМ, что в той или иной степени нашло свое отражение в их классификационно-признаковых моделях, на основе которых созданы прогнозно-поисковые модели (ППМ) рудных полей (РП) и месторождений.

Построенные по базам данным USGS (Singer et al., 2002, 2008), дополненные сведениями по ряду отечественных объектов, геолого-промышленные количественные (статистические) модели (ГПКМ) распределения МПМ по классам крупности (запасам руды и металлов) и содержаниям полезных компонентов показали зависимость запасов и содержаний Cu, Mo, Au и Ag от геотектонической обстановки формирования месторождений. Эти соотношения отражают вариации мощностей и строения блоков ЗК, вовлеченных в процессы рудообразования. Самыми значительными запасами Cu, Mo и Ag обладают Cu-Mo-порфировые месторождения андезитоидных окраинно-континентальных ВПП, характеризующихся мощным сиалическим слоем ЗК, в то время как наибольшие запасы Au сосредоточены в объектах Au-Cu-порфирового типа базальтоидных поясов островодужных и рифтовых обстановок с океанической корой. Используемые в известных классификациях МПМ отношения Cu/Mo и Au/Mo в рудах Cu-Mo-, Mo-Cu- и Au-Cu-порфировых месторождений характеризуются существенным «наложением» областей распределения, что не позволяет рассматривать их в качестве надежных критериев разделения меднопорфирового семейства на типы. Более досто-

верным критерием типизации МПМ является их геотектоническая позиция, от которой зависят петрология продуктивных плутоногенных формаций, метасоматическая зональность и вещественный состав руд месторождений. По этому критерию месторождения семейства и вмещающие их РМС могут быть разделены на две группы, принадлежащие базальтоидным и андезитоидным ВПП – *золото-медные* и *молибденово-медные*. Первые связаны с магматическими формациями габбро-диорит-тоналитового ряда На профиля, вторые – с К-На- и Na-K формациями габбро-диорит-гранодиоритового и диорит-гранодиорит-монзонитового рядов.

Анализ отечественных и зарубежных публикаций последних 25 лет показал, что многие МПМ локализованы во внутренних частях крупных (до 20-30 км и более в поперечнике) МП РМС с комплексной металлогенией (КМП РМС). Во *фланговых* частях таких систем присутствуют Au-Cu- и Au-Pb-Zn скарновые, жильные и жильно-прожилковые золото-кварцевые, золото-полисульфидные, иногда золотопорфировые месторождения, а в *верхних периферийных* – эпитермальные Cu-Au- и Au-Ag «высокой (HS) и средней (IS) сульфидизации», а также самородной серы. Все они генетически связаны с едиными магматическими очагами. Однако сочетания разнотипных рудных объектов в объемах единых КМП РМС в базальтоидных и андезитоидных ВПП, как показало сравнение рудно-формационной зональности нескольких десятков принадлежащих этим поясам систем, различны. Главной причиной этих различий является более глубокая дифференциация «материнских» магматических очагов в андезитоидных ВПП с континентальной ЗК и, соответственно, более сложное их строение. В таких поясах выделяются до трех структурно-формационных этажей, отвечающих раннему, среднему и позднему этапам их развития, каждому из которых свойственна «собственная» металлогения. В ряде систем наряду с МПМ и «сопряженными» (парагенетическими) с ними месторождениями других РФТ, возникшими на раннем этапе становления ВПП, отмечаются рудные объекты «совмещенного» типа – фундамента поясов, а также образовавшиеся на более поздних этапах развития последних. Для базальтоидных ВПП с океанической корой и более простым строением характерны КМП РМС только с «сопряженными» типами оруденения (таблица 1).

Установленные различия в рудно-формационной зональности КМП РМС базальтоидных и андезитоидных поясов в сочетании с другими характеристиками (петрологическими, рудно-метасоматическими, геохимическими) позволили выделить две группы таких систем: *золото-меднопорфировую диоритовую* и *молибден-меднопорфировую гранодиорит-монзонитовую*. Различия в их строении (сочетаниях разнотипной минерализации) учтены при металлогеническом районировании территории России и ее отдельных регионов на меднопорфировые и сопряженные руды цветных и благородных металлов, что явилось решением первой из поставленных задач исследований.

Сделанные выводы проиллюстрированы в работе кратким описанием конкретных КМП РМС – в базальтоидных ВПП: *Бату Хайджаяу, Гумпангпиту, Иланг, Хуу* островной дуги Санда (Индонезия); *Баджо и Манкайян* на острове Лусон (Филиппины); *Фрида-Ривер–Нена* (Папуа – Новая Гвинея) и *Эртсберг* (Индонезия) Новогвинейского ВПП; *Вознесенской* Ирэндыкского и *Верхнеуральской* Гумбейского на Урале; в андезитоидных ВПП: *Алмалыкской* и *Каульдинской* Бельтау-Кураминского (Узбекистан); *Екдэжычской (Баимской)* Курьинского, *Левинсон-Лессинга, Малетойваямской* Коряжско-Центрально-Камчатского; *Томинско-Березняковской* Увельско-Еленовского (Ю. Урал),

Таблица 1 – Комплексные меднопорфировые рудно-магматические системы (КМП РМС) базальтоидных и андезитоидных ВПП (составлена с использованием данных [Кривцов, Звездов, Мигачев, Минина, 2001; Мигачев, Звездов, Минина, 2022])

| Характеристики | Золото-меднопорфировые диоритовые КМП РМС | Молибден-меднопорфировые гранодиорит-монцонитовые КМП РМС | |
|--|---|--|--|
| 1 | 2 | 3 | |
| Геотектоническая позиция | Базальтоидные ВПП – барьерные зоны островодужных структур, рифты | Андезитоидные ВПП: окраинно- (периокеанические) и внутриконтинентальные | |
| Состав фундамента поясов | Фемический | Сиало-фемический, фемически-сиалический | |
| Рудоносные интрузивные формации | Габбро-диорит-кварцево-диоритовая (плаггиогранитная), натриевая | Габбро-диорит-гранодиоритовая, калиево-натриевая Диорит-гранодиорит-монцонитовая, натриево-калиевая | |
| Отношение K_2O/Na_2O | 0,1 – 0,4 | 0,5 – 1,2 | |
| Рудоносные порфировые фазы | Диоритовые, кварцевые диоритовые порфириты, плаггиогранит-порфириты | Гранодиорит-порфириты, кварцевые монцонит-порфириты | |
| Значение индекса $S/I = Al_2O_3 / (Na_2O + K_2O + CaO)$. По Дж.Гриффитсу и К.Гудвину, 1982 г. | 0,6 – 0,9 | 0,7 – 1,1 | |
| Геохимические характеристики по С.Титли и Р.Бину, 1981 г.: Sr^{87}/Sr^{86} | 0,705 | 0,703-0,710 | |
| Рудно-формационные типы меднопорфирового семейства | Au-Cu-порфировый Cu-порфировый | Au-Mo-Cu-порфировый Cu-Mo-порфировый | |
| Основные и (второстепенные) типичные рудообразующие минералы | Пирит, халькопирит, магнетит, гематит, борнит (пирротин) | Пирит, халькопирит, молибденит, борнит (магнетит, галенит, сфалерит) | |
| Геохимические особенности руд: Отношение Cu/Mo в первичных рудах Отношение Cu/Au Содержание Re в молибдените | 250:1 и более 9000:1 – 75000:1 600 – 1500 (до 1800) | 15–30:1 – 200:1 15000:1 – 200000:1 50 – 1000 (до 1600) | |
| Состав метасоматических изменений и их зональность (от центра к периферии): К – калишпатизация, Б – биотитизация, Ф – филлизитизация, А – аргиллизация, П – пропилизация | Ф–Б–П, Ф–А–П, Б–П | К–Б–Ф–А–П, Б–Ф–А–П, Ф–А–П | |
| Месторождения, сопряженные с меднопорфировыми в объеме единых КМП РМС, сформировавшиеся на разных этапах становления ВПП | Поздний этап | Отсутствуют | Жильные и штокервовые редких металлов и земель, серебра, флюорита, сурьмы и ртути |
| | Средний этап | Отсутствуют | Редкометалльные (Mo, W, Sn, W) кварцево-жильно-грейзеновые, скарновые и скарново-грейзеновые |
| | Ранний этап | Эпитермальные Cu-Au- и Au-Ag-ные стратоидные, жильные и жильно-прожилковые HS и IS типов; Au-Cu- и Cu-скарновые; редко: вулканогенные медные (типа магнто) и жильные полиметаллические | Эпитермальные Cu-Au-ные HS типа и реже Au-Ag-ные IS типа – стратоидные, жильные и жильно-прожилковые; самородной серы; Au-порфировые, мезотермальные жильные и штокервовые Au-кварцевые, Au-сульфидно-кварцевые, Au- и Au-Ag-полисульфидные; проксимальные Au-Cu- и дистальные Au-Pb-Zn-вые скарновые; редко: боросиликатные стратоидные |

Продолжение таблицы 1

| 1 | 2 | 3 |
|---|--|---|
| Месторождения фундамента андезитовидных ВПП, совмещенные с меднопорфиrowыми в объеме единых КМП РМС | Отсутствуют | Полиметаллические стратиформные; железорудные (магнетит-гематитовые, магнетитовые, медно-титано-магнетитовые) магматические и скарновые; редко: медноколчеданные и колчеданно-полиметаллические, Au-Cu-Fe-оксидные |
| Примеры КМП РМС | Воскресенская, Верхнеуральская, Ключевская, Круглогорская, Кияктинская, Кедабекская (Россия); Эртсберг, Бату Хайджау, Тумпангпиту, Иланг, Хуу (Индонезия); Баджио, Манкайян, Тампакан (Филиппины); Фрида-Ривер-Нена, Уафи-Голпу (Папуа – Новая Гвинея); Сепон (Лаос) | Екдэкгычская, Чаплинская, Левинсон-Лессинга, Центральнo-Камчатская, Малетойваямская, Сээрваямская. Медьгорская, Томинско-Березняковская, Янаслорская, Новогодненская, Элькошорская, Ауэрбахoвская, Круглогорская, Тарутинская и др. (Россия); Алмалыкская (Узбекистан); Коунрадская, Акчатауская, Карагайлы (Казахстан); Речк-Лахоца (Венгрия); Бор, Златно (Сербия); Злата Баян, Словакия; Окно-де-Фьер, Румыния; Панагорская (Болгария); Андакколо (Чили); Бингхэм Каньон, Суперитор, Минерал Парк; Коппер Каньон (США) |

Ауэрбахoвской, Янаслорской, Новогодненской и др. Ауэрбахoвско-Новогодненского; Медьгорской Охотско-Чукотского (Россия); Речк–Лахоца Внутренне-Карпатского (Венгрия); Бингхэм Каньон Уосатцкого (США); Коунрадской (Коньратской) и Акчатауской Прибалхашско-Илийского (Казахстан).

Раздел 2. ОБСТАНОВКИ ФОРМИРОВАНИЯ КРУПНЫХ И СВЕРХКРУПНЫХ МЕДНОПОРФИРОВЫХ МЕСТОРОЖДЕНИЙ, КРИТЕРИИ ИХ ПРОГНОЗА И ПОИСКОВ

Второе защищаемое положение. Меднопорфиrowые месторождения «мирового класса» формировались в отдельных сегментах андезитовидных и базальтоидных ВПП, на ранних этапах развития которых преобладал режим интенсивного коллизионного сжатия, подавлявший вулканизм и приводивший к возникновению мощных флюидонасыщенных магматических очагов в верхней части земной коры. Необходимым условием для рудонакопления в значительных масштабах в период разгрузки этих очагов была петрофизическая неоднородность геологических разрезов, а именно наличие над рудоносными интрузивами малопроницаемых толщ, способствовавших концентрированию металлов. Благоприятную роль играли карбонатные либо богатые железом мафические вмещающие породы, являвшиеся геохимическими барьерами для гидротермальных растворов и приводившие к отложению высокосортовых руд, а также рудное вещество геохимических аномалий и месторождений субстрата андезитовидных ВПП, подвергнувшихся регенерации в тепловом поле плутонов.

Сформировавшиеся в подобных обстановках объекты выделяются повышенными содержаниями металлов в рудах, отражающими совмещение в пространстве продуктов многостадийного магматизма и рудогенеза.

Анализ публикаций по крупным и сверхкрупным (гигантским и супергигантским) МПМ показал, что для формирования таких объектов необходимо сочетание благоприятных геодинамических, структурно-петрофизических и геохимических факторов.

Уникальные по запасам месторождения возникали в **специфических геодинамических обстановках** в отдельных сегментах окраинно-континентальных и островодужных ВПП, на начальных стадиях развития которых в результате «пологой» субдукции океанических хребтов и плато под континентальные окраины и островные дуги господствовал *режим коллизионного сжатия*. Такой режим способствовал утолщению земной коры, выплавлению известково-щелочных магм при ее взаимодействии с астеносферой, насыщению магм летучими веществами за счет субдуцирующих океанических плит, мантийного слэба и дегидратации металлоносных осадков, что приводило к появлению окисленных расплавов с повышенными содержаниями Cu, Au, Ag. Сжатие препятствовало подъему расплавов в верхние части ЗК, т.е. «подавляло» вулканизм, приводя к возникновению крупных магматических камер (очагов) на глубинах от 5 до 15 км, в которых скапливались значительные объемы отделявшихся от кристаллизующейся магмы металлоносных флюидов (Cook et al., 2005; Richards, 2003, Sillitoe, 2010).

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, обогащенный летучими компонентами и металлами. На дневной поверхности в этот период магматические очаги проявлялись слабой вулканической и фумарольной активностью. Возможными триггерами, вызывавшими «вскрытие» магматических камер при последующем 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 (Richards, 2019). При взламывании вскрыши происходили масштабные эксплозивные извержения с «распылением» рудного вещества. При наличии препятствий к достижению остаточным расплавом дневной поверхности формировались порфировые интрузивы, а при их становлении – каркасы мелких «взрывных» и контракционных трещин, часто брекчиевые трубки, по которым флюиды поднимались от источников – промежуточных магматических очагов – к областям разгрузки (рудоотложения). Возникали МП РМС, а в их внутренних зонах, сравнительно быстро, по разным оценкам (Кривцов и др., 2001; Steinberger et al., 2013 и др.), от ≤ 100 тыс. лет до первых сотен тыс. лет, на небольших глубинах (до 3 км) формировались МПМ.

Крупные магматические очаги появлялись в областях сопряжения парных систем глубинных «внутридуговых» 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 сжимающим давлением. Их разрядка приводила к воздыманию участков ЗК, взбросо-сдвиговым деформациям и возникновению глубинных магмо- и флюидовыводящих крутопадающих каналов («полостей») в местах пересече-

ния разломов, перегибов, флексур), контролировавших размещение магматических очагов, «питавших» гипабиссальные и субвулканические порфировые интрузивы (штоки, рои даек, брекчиевые трубки), с которыми ассоциируют МПМ. Именно в таких областях сосредоточено большинство из известных четырех десятков крупнейших Cu-Mo-, Au-Mo-Su- и Au-Cu-порфировых месторождений мира, среди которых: Чуикамата, Эль Теньенте, Эль Абра, Рио Бланко-Лос Бронсес, Бингхэм, Пebbл, Грасберг и др. (Cook et al., 2005).

В участках ВПП Тихоокеанского кольца, Тетиса, Карпато-Балканской и др. минерогенических провинций, развивавшихся в *режиме слабого растяжения ЗК*, распространены *мелкие и средние по запасам Au-Mo-Cu- и Au-Cu-порфировые месторождения* (Sillitoe, 2010). Они локализованы во внутренних частях РМС со сравнительно небольшими магматическими очагами. В верхних зонах таких систем, в близповерхностной зоне интенсивных аргиллизитовых изменений, нередко присутствуют Au-Cu- и Au-Ag месторождения NS и IS типов. Примеры подобных РМС: Лепанто, Баджио (Филиппины), Андаколло, Рефуждио (Чили), Янакоча (Перу), Речк (Венгрия), Бор (Сербия), Кёплер (Турция), Озерновская, Авачинско-Китхойская, Малетойваямская (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 отсутствии «литолого-структурных ловушек» разгрузка восходящего из очага металлоносного флюидного потока могла привести к образованию обширных ореолов рассеянной минерализации с низкими содержаниями металлов (геохимических аномалий) либо мелких объектов (Gow, Walshe, 2005). Наиболее благоприятными для рудонакопления были петрофизически неоднородные (гетерогенные) среды. Наличие малопроницаемых, пластично деформирующихся толщ либо «жестких» блоков над рудоносными интрузивами обуславливало анизотропию полей тектонических напряжений, отражалось в стилях и интенсивности деформаций пород при их разрядке, приводило к появлению структур, в которых происходила разгрузка рудоносных растворов (Звездов, 2019).

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 (Гзовский, 1975; Старостин, 1988) 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 и терригенно-карбонатные отложения, широко развитые в фундаменте (субстрате) островодужных базальтоидных и некоторых периокеанических андезитоидных ВПП. При высоких температурах и давлении они подвержены пластичным деформациям. Ко *второму*, характерному для андезитоидных поясов с сиалофемическим и сиалическим фундаментом, можно отнести лавовые фации вулканитов среднего состава, габбро-диориты и диориты ранних фанеритовых фаз рудоносных магматических комплексов, 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 значительных тектонических нагрузок. При

существенных различиях в деформационном поведении толщи обоих типов обладают низкими фильтрационными свойствами, т.е. малопроницаемы для гидротермальных растворов, являясь для них своеобразными «структурно-петрофизическими экранами».

К толщам упруго-пластичного деформационного типа отнесены третичные известняки Новогвинейской (Дарай/Менди) формации, которые, по данным (Gow, Walshe, 2005), перекрывают мезозойские обломочные породы формаций Йеру и Чим и участвуют в строении субстрата кайнозойского Новогвинейского ВПП. С плутогенными формациями последнего сопряжены Au-Cu-порфиновые месторождения-гиганты Грасберг, Голпу, Ок Теди и Фрида Ривер. Слагая верхние части геологического разреза, эти известняки (с «пластичным» деформационным поведением при высоких температурах и давлении) в сочетании с режимом коллизионного сжатия способствовали скоплению флюидов в промежуточных магматических очагах, а затем, при их вскрытии и разгрузке, оказывали экранирующее воздействие на восходящий флюидный поток, приводя к рудонакоплению в значительных масштабах.

Признаки влияния «экранировавших» карбонатных и терригенно-карбонатных толщ на рудогенез отмечаются не только в поясах ЮВ Азии, но и в ВПП Северной и Южной Америк, Европы и Азии – на Au-Mo-Cu-порфириновых месторождениях – сверхкрупных, таких как Бингхэм, Санта Рита, Резолюион (США), Алмалык (Узбекистан), и рядовых объектах – Речк (Венгрия), Кызата, Сары-Чеку, Нижнекаульдинское (Узбекистан), Цаган-Субурга, Хармагтай (Монголия), Златно (Чехия), Майданпек (Сербия), Кёпpler (Турция), Cu-Mo-порфирином Томороча (Перу). В верхних частях рудовмещающих разрезов этих месторождений присутствуют мраморизованные известняки, доломиты, мергели.

К упруго-вязкому типу сред отнесены миоценовые андезитовые лавы формации Фареллонес (с субвулканическими телами мафического комплекса Теньенте), перекрывающие олигоценовую толщу переслаивающихся песчаников, алевролитов и туфобрекчий формаций Абанико и Гойя Мачали фундамента андезитоидных ВПП с уникальными по запасам Cu-Mo-порфириновыми месторождениями Эль Теньенте, Рио Бланко-Лос Бронсес, Лос Пеламбес в центральной части Чили. При коллизионном сжатии разрядка тектонических напряжений происходила в основном по подошве компетентной толщ с возникновением срывов надвигового типа. В нижележащих туфогенно-осадочных отложениях возникали складки, трещины и разломы преимущественно склового типа, по которым рудоносные расплавы поднимались до гипсометрического уровня андезитовой толщ формации Фареллонес (Gow, Walshe, 2005). Избыточное давление газов, возникавшее под этой малопроницаемой толщ, приводило к неоднократному ее прорыву с взрывным растрескиванием и возникновением многофазных трубок гидротермально-магматических брекчий, вмещающих значительные запасы руд.

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 кровле рудоносного интрузива крупного Mo-Cu-порфиривого месторождения Эрдэнтуин-Обо (Монголия).

Практически все гигантские и супергигантские Cu-Mo-, Au-Mo-Cu- и Au-Cu-порфириновые месторождения андезитоидных и базальтоидных ВПП Тихоокеанского кольца

отличаются высокими (для МПМ) концентрациями металлов в рудах (средние содержания Cu обычно не менее 1,0 %), что является следствием не только специфических геодинамических обстановок их формирования, но и наложения продуктов многостадийного рудогенеза из-за «экранирующего» воздействия перекрывающих толщ.

В работе приведено детальное описание типовых МПМ обеих различающихся по петрофизическим характеристикам групп – *первой*: Бингхэм, Резольюшон (США), Ок Теди (Папуа Новая Гвинея), Чукикамата (Чили), Речк (Венгрия), Кеплер (Турция), Алмалыкского, Нижнекаульдинского и Кызата (Узбекистан); *второй*: Эль Теньенте, Рио Бланко–Лос Бронсес. Сделан вывод о том, что рассмотренными ситуациями не исчерпывается многообразие возможных геодинамических и структурно-петрофизических обстановок формирования МПМ. Существуют многочисленные «переходные» варианты систем со «средними параметрами» магматических очагов и вмещающих сред преимущественно *упругого (упруго-хрупкого)* деформационного типа.

На многих МПМ, как гигантских, так и рядовых, перекрывающие толщи с «упруго-пластичным» либо «упруго-вязким» деформационным поведением являлись также *геохимическими барьерами*. *Магнетитсодержащие скарны*, развитые по карбонатным породам в экзоконтактах рудоносных интрузивов, вызывали осаждение рудного вещества из гидротермальных растворов, приводя к образованию проксимальных Au-Cu- и дистальных Pb-Zn-скарновых залежей с высокими содержаниями металлов. Примеры: Бингхэм, Грасберг, Ок Теди, Кэдя Хилл, Саяк, Майданпек; в России – Быстринское, Ауэрбаховское, Медь-Гора. *Богатые железом базитовые комплексы* также являлись барьерами для окисленных металлоносных растворов, приводившими к образованию высокосортовых руд. По данным Р.Силлитоу [Sillitoe, 2010], до половины запасов ряда сверхкрупных месторождений сосредоточено в гидротермально-измененных породах основного состава: габбро-диабаз-базальтовом комплексе на Эль Теньенте (Чили), силлах протерозойских диабазов на Резольюшон, Рэе и Минерал Парк в Аризоне (США), толеитовых базальтах на участке Хьюго Даммет Оюу Толгой (Монголия).

Геохимическими барьерами, вызывавшими разгрузку металлоносных растворов, могли также быть *воды немагматического происхождения*, о чем свидетельствуют исследования минеральной зональности и изотопии серы сульфидов руд многофазной трубки гидротермально-магматических брекчий Сур-Сур [Frikken et al., 2005], в которой сосредоточена четверть запасов (около 10 млн. т Cu) супергигантского месторождения Рио-Бланко–Лос-Бронсес в Чили. Результатами этих работ показано, что высокосортовые (с содержанием Cu > 2 %) сульфидные руды в верхней части трубки могли образоваться при реакционном взаимодействии медьсодержащих концентрированных магматических рассолов с кислыми по составу метеорными (возможно, морскими) водами, сыгравшими роль окислительно-восстановительного барьера.

Геохимический профиль комплексов субстрата ВПП влиял на вещественный состав руд МПМ, что отражено в их классификациях. Породы интрузивной рамы (фанеритовых фаз продуктивных формаций и древнего фундамента) могли также являться одним из источников рудного вещества, о чем свидетельствуют обширные отрицательные (с содержаниями ниже фоновых) аномалии меди и других металлов на флангах некоторых МП РМС. Рядом исследователей они рассматриваются как области рудосбора – выщелачивания металлов из вмещающих пород растворами, циркулировавшими в тепловом поле порфировых интрузивов. Примеры подобных систем – рудные районы

Хайлэнд Вэлли в Канаде, Дексинг и Дубоашан в КНР, Актогайское рудное поле в Казахстане приведены в работах [Гольдберг и др., 2014; Кривцов и др., 2001].

Рудные месторождения фундамента ВПП, подвергавшиеся регенерации в ходе формирования комплексных МП РМС, также могли быть источником металлов, на что указывает развитие жильной и прожилковой полисульфидной (с Au и Ag) минерализации на флангах многих МПМ андезитовидных поясов, в субстрате которых присутствуют карбонатные отложения с сингенетичными полиметаллическими месторождениями. В частности, Au-Ag-полисульфидные минеральные ассоциации фланговых частей Au-Mo-Cu-порфировых штокверков Алмалыкского РП могли образоваться за счет экстракции рудного вещества разогретыми метеорными водами (с последующим переотложением в трещинах) из стратиформных залежей свинцово-цинковых руд учкулакского типа, присутствующих во вмещающей известняково-доломитовой толще фундамента Бельтау-Кураминского ВПП. В непосредственной близости к северу от Кальмакырского штока гранодиорит-порфиров, с которым сопряжено одноименное МПМ, находится частично регенерированное в его тепловом поле месторождение такого типа Кургашикан. На удалении же, в южной части Алмалыкского грабена, известно не затронутое этим процессом однотипное месторождение Кульчулак.

Примерами подобных объектов также являются МПМ Карпато-Балканского региона: Златица-Плавица, Медет, Златно, Речк, Злата Баня, Окно-де-Фьер, на флангах которых развиты жильно-прожилковые полисульфидные (с Au и Ag) руды, а во вмещающих карбонатных толщах – частично регенерированные стратиформные полиметаллические залежи, а также гигантское Au-Mo-Cu-порфировое месторождение Бингхэм Уосатчского ВПП (США), в карбонатных формациях фундамента которого отмечаются стратоидные залежи свинцово-цинковых руд миссисипского типа. Ореол прожилковой полисульфидной минерализации вокруг этого объекта простирается далеко за пределы пиритового ореола – на расстояние до 8 км от рудоносного штока кварцевых монцит-порфиров, что не может быть объяснено только рудно-метасоматическими процессами, связанными с проникновением магматогенных флюидов из «материнского» очага, как это сделано в модели МП РМС Р.Силлитоу [Sillitoe, 2010]. Более приемлемо предположение о частичном заимствовании вещества древних полиметаллических месторождений метеорными водами, активизированными в тепловом поле интрузива.

Проведенный по значительному объему отечественных и зарубежных публикаций анализ закономерностей размещения, геологии и генезиса меднопорфировых и сопряженных с ними месторождений позволил установить факторы, способствовавшие формированию крупных и особо крупных МПМ, определить критерии их прогноза и поисков (Звездов, 2021), что явилось решением *второй задачи* исследований.

1. МПМ «мирового класса» формировались в специфических геодинамических и структурно-петрофизических обстановках. Благоприятными для их возникновения были сегменты магматических дуг (ВПП), на ранних стадиях развития которых господствовал режим интенсивного коллизионного сжатия, подавлявший вулканизм и приводивший к появлению мощных флюидонасыщенных магматических очагов в верхней части ЗК. В период их разгрузки при инверсии тектонических напряжений необходимым условием для рудонакопления в значительных масштабах было наличие над рудоносными интрузивами малопроницаемых толщ упруго-пластичного либо упруго-вязкого деформационного типа, которые способствовали накоплению металло-

носных флюидов. В отложении высокосортных руд, характерных для крупных и сверхкрупных МПМ, ведущую роль играли богатые железом скарновые залежи (в карбонатных толщах в экзоконтактах интрузивов) либо мафические комплексы, которые являлись геохимическими барьерами для гидротермальных растворов. В формировании месторождений также участвовали разогретые метеорные воды, переотлагавшие вещество древних геохимических аномалий и регенерированных рудных месторождений фундамента ВПП.

2. Петрофизическая гетерогенность рудовмещающих сред, отмечающаяся для МП РМС с крупными МПМ, способствовала рудоконцентрации. В присутствии малопроницаемых *карбонатных* либо *терригенно-карбонатных* толщ, способных к *пластическим деформациям* при высоких температурах и давлении, над «материнскими» плутонами рудоотложение из высококонцентрированного раствора, отделявшегося от остаточного расплава, происходило в эндо-экзоконтактных зонах порфириновых штоков – выступов-апофиз этих интрузивов, являвшихся «проводниками» тепла и рудного вещества. «Экранировавшие» толщи препятствовали проникновению металлоносных флюидов в верхние и периферийные части РМС, о чем свидетельствуют безрудные аргиллизитовые «шляпы» многих месторождений-гигантов.

В РМС с Au-Cu- и Au-Mo-Cu-порфириновыми месторождениями базальтоидных и ряда андезитоидных поясов присутствие подобных толщ в верхах геологических разрезов препятствовало подъему легкой газовой фазы, отделявшейся от кристаллизующегося остаточного расплава и обогащенной благородными металлами, в верхние части ЗК, где в иных обстановках их разгрузка приводила к образованию эпитеpmальных Au-Cu и Au-Ag стратоидных и жильно-прожилковых месторождений HS и IS типов. Для крупных объектов подобных «подэкранных» обстановок характерны аномально высокие для МПМ содержания золота (г/т) в собственно порфириновых рудах. Значительная часть запасов меди и золота при этом сосредоточена в скарновых залежах в экзоконтактах порфириновых штоков.

В варианте мощных перекрывающих толщ, относящихся к *упруго-вязкому* типу сред, подобных лавовым и субвулканическим фациям мафического комплекса Теньенте формации Фареллонес, рудоносные интрузивы обычно локализованы на одном уровне либо под ними. Значительная доля запасов руд сопряженных с ними штокверков сосредоточена в апикальных частях порфириновых штоков и брекчиевых трубках, возникавших 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 магматических и гидротермально-магматических (с биотитовым, ангидритовым, турмалиновым цементом) брекчий. Последние вмещают значительные объемы руд, как на гигантских Cu-Mo-порфириновых месторождениях Эль Теньенте, Рио Бланко–Лос Бронсес, Лос Пеламбрес в Чили. Формы минерализованных зон самые разнообразные – от воронко- и трубообразной (цилиндрической), дайкоподобной до сложной комбинированной, зависящей от морфологии порфириновых интрузивов и «надстраивающих» их брекчиевых тел. Содержания металлов в рудах довольно высокие из-за многократного, пульсационного поступления расплава и флюидов из магматического очага, о чем свидетельствуют многочисленные рудообразующие минеральные ассоциации.

В отсутствии толщ, игравших роль петрофизических и геохимических барьеров, даже при крупных магматических очагах формировались крупнообъемные штокверки, но с убогими рудами (пример – месторождения Актогайского РП в Казахстане, Малыжское в России), а при «ограниченном» потенциале очагов – зоны рассеянной минерализации (геохимические аномалии), в лучшем случае – мелкие объекты.

3. Для поисков МПМ наиболее перспективны магматогенные поднятия длительного «воздымания» с многофазными плутонами рудоносных формаций в «ядрах» таких структур. К *критериям прогноза крупных объектов* следует отнести: наличие нескольких порфировых фаз (штоков, даек, брекчиевых трубок) – производных длительно функционировавших рудоносных магматических очагов; многостадийность рудообразования, выражающуюся в многочисленных разновозрастных минеральных ассоциациях руд; их пространственное совмещение, приводящее к повышенным концентрациям металлов из-за телескопирования одновременных «порций» металлоносных флюидов и влияния петрофизических и геохимических барьеров. На мелких объектах обычно выделяются одна-две порфировые фазы и ограниченное число минеральных ассоциаций, причем наиболее поздние с полиметаллами слабо проявлены либо отсутствуют вовсе.

Значительные размеры «материнских» интрузивов, с которыми сопряжены крупные месторождения, соответствующим образом отражаются в параметрах (поисковых признаках) связанных с их становлением гидротермальных рудогенерирующих систем. Площади зон рудовмещающих метасоматитов на таких объектах составляют $n \cdot \text{км}^2$, геохимических (Cu, Mo, Pb, Zn) и пиритовых ореолов – $n - n \cdot 10 \text{ км}^2$, электроразведочных и магнитометрических аномалий – $n \cdot 10 \text{ км}^2$. Вертикальный размах оруденения на месторождениях-гигантах обычно превышает 1 км. Поэтому при оценке масштабности проявлений меднопорфировых руд целесообразно использование их параметрических моделей с количественным описанием частей рудоносного пространства: надрудной, собственно рудовмещающей, подрудной, а также фланговых и периферических.

4. Влияние «экранирующих» толщ на возникновение МПМ до сих пор недооценивалось, поскольку на большинстве из них они в значительной мере ассимилированы магматическим расплавом, преобразованы наложенными метасоматическими процессами, уничтожены эрозией и сохранились лишь на флангах рудных районов и полей либо в виде ксенолитов в интрузивных массивах. Между тем, подобные толщи отмечаются практически на всех месторождениях-гигантах андийских, кордильерских, новогвинейских, азиатских ВПП. Кроме очевидного влияния на концентрацию металлов в рудах, «бронирующие» толщи способствовали сохранности МПМ от эрозии. В условиях активных магматических дуг, при резком воздымании тектонических блоков ЗК, месторождение может быть полностью уничтожено в короткий (в геологическом смысле) промежуток времени – десятки – сотни тыс. лет [Wainwright et al., 2017], чем объясняется мезозой-кайнозойский возраст большинства меднопорфировых объектов мира.

Таким образом, положительными критериями для выделения территорий, перспективных для обнаружения скрытых, в том числе крупных, МПМ, являются реликты (ксенолиты) слабопроницаемых толщ, перекрывающих гранитоиды рудоносных плутоногенных формаций. В ряде случаев под такими толщами могут быть 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 отсутствуют вовсе.

5. Для создания методики поисков МПМ, скрытых под малопроницаемыми толщами, необходимы новые методы и технологические средства. Целесообразно применение глубинных методов сейсмо-, грави- и магниторазведки с моделированием морфологии рудоносных интрузивов и нижезалегающих «материнских» гранитоидных массивов, а также космодешифрирование для выделения кольцевых и радиальных тектонических структур, фиксирующих тектонические «просадки» над ними. Среди современных геохимических методов поисков перспективны EnzymeLeachSM и BioLeach модификации частично-фазового анализа, эффективность которых продемонстрирована [Eppinger et al., 2013] на крупнейшем Au-Mo-Cu-порфировом месторождении Пebbл (Аляска, США), восточный фланг которого, где сосредоточено свыше 70 % запасов, перекрыт мощным (от 150 до 450 м) осадочно-вулканогенным чехлом.

Для поисков скрытых МПМ могут быть использованы современные методы микроанализа (LA-ICP-MS, SEM-EDS и WDS) элементов-примесей в минералах-индикаторах. Как показано опытно-методическими работами USGS [Wilkinson et al., 2020; Baker et al., 2020; Cook et al., 2020; Pacey et al., 2020] по ряду месторождений, среди которых были как сверхкрупные, сформировавшиеся под петрофизическими «экранами» (Cu-Mo-порфировые Эль Теньенте и Коллахуази в Чили, Резолюцион в США), так и рядовые Au-Cu-порфировые в Австралии (E48 и E26), *хлорит* и *эпидот* пропилитовых ореолов МПМ характеризуются повышенными содержаниями As, Sb, Ti, Mn, Zn, Pb, Mg, Co. Они фиксируются на площадях, значительно превосходящих геохимические ореолы, выявляемые традиционными методами по валовому составу пород, что может быть использовано для выявления внешних, слабо проявленных частей пропилитовых ореолов скрытых объектов в областях регионального зеленокаменного метаморфизма, повсеместно развитого в ВПП. Применение подобных методов в практике ГРП требует 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 рудных районов, а кроме того, достаточной обнаженности изучаемых территорий либо поверхностных горных выработок и/или скважин, по которым должны отбираться образцы для анализов. Тем не менее, включение инновационных методов в поисковый комплекс представляется необходимым, поскольку фонд месторождений, обнаруживаемых традиционными методами ГРП, практически исчерпан.

Раздел 3. МЕДНОПОРФИРОВЫЕ ШТОКВЕРКИ РАЗЛИЧНЫХ СТРУКТУРНО-ПЕТРОФИЗИЧЕСКИХ ОБСТАНОВОК ФОРМИРОВАНИЯ

Третье защищаемое положение. Деформационное поведение пород при внедрении магмы и их фильтрационные свойства влияли на морфологию порфировых интрузивов, форму и строение сопряженных с ними рудоносных штокверков, уровни концентрации металлов в рудах и запасы месторождений, что необходимо учитывать при их поисках и оценке. Основными механизмами возникновения рудовмещающих структур были гидроразрыв и контракция при охлаждении, кристаллизации и дефлюидизации рудоносных магматических тел, приводившие к образованию трещин в их апикальных частях, а также в породах кровли с раскрытием более древних нарушений. Масштабы проявления этих процессов зависели от петрофизических характеристик вмещающих сред.

Метасоматические преобразования пород сопровождалась значительными изменениями их физико-механических свойств. Установление направленности и масштабов этих изменений может быть использовано для оконтуривания минерализованных зон.

Для решения *третьей задачи* работ проведены комплексные исследования Au-Mo-Cu-порфировых месторождений Алмалыкского (Кальмакыр, Дальнее, СЗ Балыкты) и Саукбулакского (Кызата) РП в Узбекистане и Mo-Cu-порфировых Актогайского (Актогай, Айдарлы) и Коксайского (Коксай) РП в Казахстане. Названные объекты различаются рудоносными плутогенными формациями (Na-K и K-Na профиля), рудно-метасоматической зональностью, вещественным составом руд, породами интрузивной рамы, а также формами порфировых штоков и сопряженных с ними штокверковых рудных тел, отнесенных к разным типам морфологической классификации МПМ.

Методика исследований включала:

- детальную документацию керна скважин по 2–3 профилям вкрест простирания рудоконтролирующих структур с определением характера и степени метасоматических изменений пород и минерального состава руд (с отбором образцов и проб);
- оценку прожилковой массы разновозрастных минеральных ассоциаций в объеме вмещающих пород (в %), для чего по десятиметровым интервалам керна проводился учет количества и мощности прожилков и жил различного минерального выполнения;
- геологическое картирование стенок Кальмакырского карьера с массовыми замерами ориентировки прожилков и жил рудных минеральных ассоциаций;
- микроскопическое и аналитическое изучение пород и руд;
- определение физико-механических свойств пород и руд (плотности, фильтрационных и упруго-прочностных параметров, твердости) по методике В.И.Старостина [1979] по образцам керна скважин.

По результатам выполненных работ, с учетом данных опробования, были отстроены геологические планы и разрезы месторождений масштаба 1:5000 – 1:2000, отражающие метасоматическую зональность, морфологию рудных тел и распределение прожилковой массы рудных и пострудных минеральных ассоциаций в объеме штокверков; составлены таблицы физико-механических свойств пород; по опорным профилям построены разрезы в изолиниях значений наиболее информативных петрофизических показателей: эффективной пористости ($P_{\text{ф}}$), условно-мгновенного насыщения (А), постоянной насыщения (В), модуля Юнга (Е), твердости по Бринеллю (НВ) и рассчитанных по ним комплексного петрофизического (Кпк) и аномального руднопетрофизического (Кап) коэффициентов; проанализированы зависимости перечисленных параметров от характера и степени метасоматических преобразований; по опорным скважинам сопоставлены графики изменения содержания меди в рудах и значений Кпк и Кап.

По результатам интерпретации полученных данных сделаны следующие выводы.

1. Рудоносные штокверки Алмалыкского, Коксайского и Актогайского РП первых трех морфологических типов по классификации [Кривцов и др., 1980] обладают отчетливой минеральной зональностью, невысокими содержаниями металлов, сопровождаются мощными надрудными геохимическими ореолами. Основные запасы руд сосредоточены в надинтрузивных зонах штоко- или дайкообразных магматических тел с крутопадающими контактами. Объем рудных прожилков и более редких жил главных продуктивных минеральных ассоциаций в породах в среднем от 3 до 5 %, максимум 8-10%,

редко 15 %. Среди них преобладают прожилки и жилы с крутыми и средними углами падения. Внутреннее строение штокверков, расшифрованное с применением метода оценки минерализованной трещиноватости, отражает *центробежную* (от контактов порфировых интрузивов во вмещающие породы) направленность развития от ранней к поздней стадии формирования, сменяющуюся *центростремительной* на завершающей стадии (при «затухании» магматического очага). На рис. 1 показана эволюция штокверка месторождения Дальнее; принципиально подобные тенденции развития установлены и для штокверков месторождений СЗ Балыкты и Коксайского.

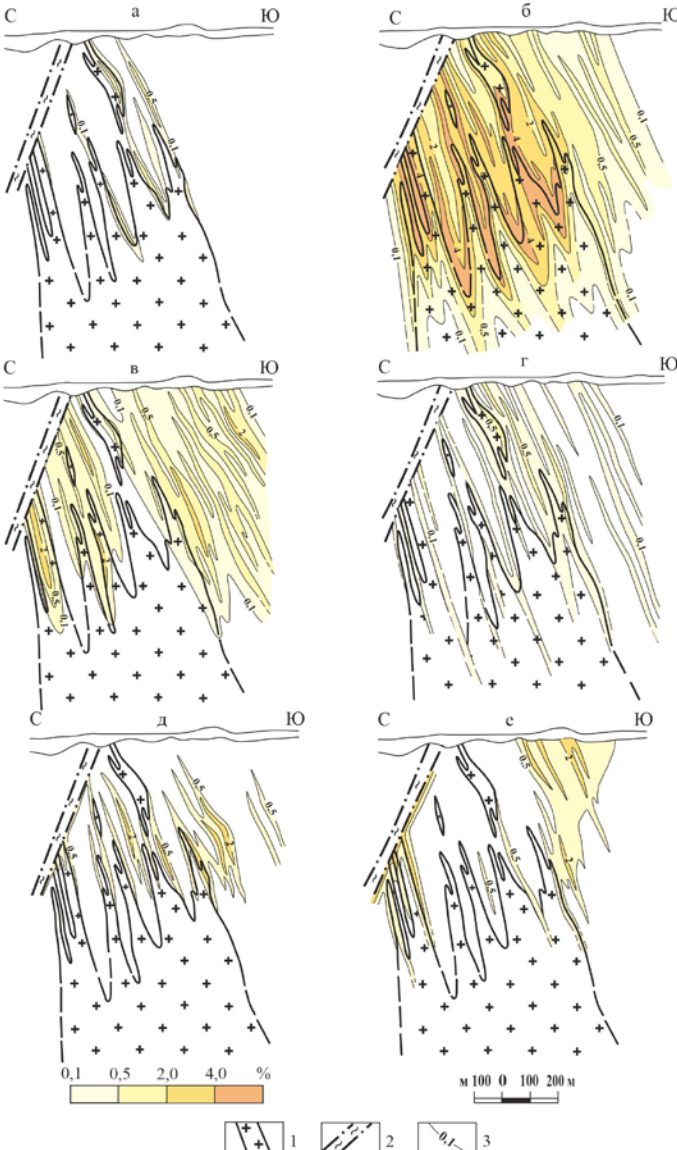


Рисунок 1 – Строение рудоносного штокверка месторождения Дальнее в разрезе по профилю III [Звездов, 2021].

Распределение объемов прожилковой массы разновозрастных минеральных ассоциаций: а – кварц-калишпат-молибденитовой, кварц-магнетитовой, кварц-молибденит-пиритовой; б – кварц-молибденит-халькопирит-пиритовой и кварц-молибденит-борнит-халькопирит-пиритовой с самородным золотом и реликтовым магнетитом; в – кварц-полисульфидной (с золотом и серебром) и кварц-энаргит-блеклорудной с серебром; г – (кварц)-халькопирит-пиритовой и (кварц)-пиритовой с золотом; д – барит-ангидритовой; е – цеолит-карбонатной

1 – рудоносный порфировый шток; 2 – зона Карабулакского разлома; 3 – изолинии объема, занимаемого прожилками и жилами в минерализованных породах, в %

Основными механизмами возникновения рудовмещающих структур были взрывной и контракционный. Они проявлялись при остывании, кристаллизации и дефлюидизации порфирированных штоков – апофиз «материнских» плутонов. Нарастание каркасов во внешние стороны от контактов интрузивов при пульсационном характере интрузивных деформаций, о чем свидетельствует сопоставление объемов прожилковой массы по стадиям рудообразования (табл. 2), происходило за счет гидроразрыва вмещающих пород из-за избыточного флюидного давления, сменяемого со временем компенсационным проседанием все более высоко расположенных участков кровли над уменьшающимися в объеме кристаллизующимися магматическими телами с раскрытием многочисленных «новых», а также более «древних» трещин. Меньшее значение имело контракционное растрескивание самих интрузивов.

Таблица 2 – Объемы полостей на разных стадиях формирования рудоносных штоковерков Алмалыкского и Коксайского рудных полей [Кривцов, Звездов, Мигачев, Минина, 2001]

| Месторождение | Число скважин | Стадии | Минеральные ассоциации | ΣМ | V _{ср} | V _{макс} | Прас | Прст | Прж | Прэн |
|-------------------------------------|----------------|-------------|--|----------------|-----------------|-------------------|------|------|-----|------|
| Северо-Западный Балыкты, Узбекистан | 17 | Ранняя | Кв+Мг Кв+ КПШ+(Мб)+Мг | 2741 | 0,36 | 1,48 | 100 | 100 | 29 | 71 |
| | | Средняя | Кв+Мб+Бр+Хп+Пи Кв+Мб+Хп+Пи с Ау | 95952 | 1,90 | 8,36 | 3501 | 3501 | 52 | 48 |
| | | Поздняя | Кв+Сф+Гл+Хп+Пи с Ау и Аг Кв+Бл.р.+Сф+Гл+Хп +Пи с Аг | 21765 | 1,20 | 4,69 | 794 | 1100 | 79 | 21 |
| | | Завершающая | (Кв)+(Хп)+Пи (Кв)+Пи с Ау | 8,648 | 0,26 | 1,07 | 316 | | | |
| | | Пост-рудная | Бар+Анг Цл+Кр | 39967 37298 | 1,33 1,25 | 9,48 6,74 | – | – | – | – |
| Дальнее, Узбекистан | 8 | Ранняя | Кв+Мг Кв+ КПШ+(Мб)+Мг | 1456 | 0,29 | 1,20 | 100 | 100 | 89 | 11 |
| | | Средняя | Кв+Мб+Бр+Хп+Пи Кв+Мб+Хп+Пи с Ау | 80618 | 1,93 | 9,49 | 5536 | 5536 | 64 | 36 |
| | | Поздняя | Кв+Сф+Гл+Хп+Пи с Ау и Аг Кв+Бл.р.+Сф+Гл+Хп +Пи с Аг | 13399 | 0,99 | 2,27 | 920 | 1106 | 87 | 13 |
| | | Завершающая | (Кв)+(Хп)+Пи (Кв)+Пи с Ау | 2716 | 0,20 | 0,88 | 186 | | | |
| | | Пост-рудная | Бар+Анг Цл+Кр | 4910 9172 | 0,78 1,00 | 3,14 3,88 | | | | |
| Коксайское, Казахстан | 15 | Ранняя | Кв+Мб, Кв+Мг, Кв+Мг+Пи | 3026 | 0,28 | 1,64 | 100 | 100 | 48 | 52 |
| | | Средняя | Кв+Мб+ Хп+Пи | 6546 | 0,91 | 2,42 | 217 | 2145 | 63 | 37 |
| | | | Кв+Мб+Бр+Хп+Пи | 58287 | 3,18 | 15,08 | 1928 | | | |
| | | Поздняя | (Хп)+Пи | 11347 | 2,44 | 2,06 | 375 | 375 | 47 | 53 |
| Пострудная | Хл+Пи | 3709 | 0,64 | 1,80 | | | | | | |
| | Кр+(Бар)+(Анг) | 21524 | 1,12 | 4,47 | | | | | | |

Примечание. Анг – ангидрит, Бар – барит, Бл.р. – блеклые руды, Бр – борнит, Гл – галенит, Кр – карбонат, Кв – кварц, КПШ – калиевый полевой шпат, Мг – магнетит, Мб – молибденит, Пи – пирит, Сф – сфалерит, Хп – халькопирит, Цл – цеолиты. ΣМ – суммарные мощности прожилков каждой из выделенных ассоциаций по учетным десятиметровым интервалам скважин, в мм. Объемы минерализованных пород, занимаемые прожилками разновозрастных ассоциаций, %. V_{ср} – средние, V_{макс} – максимальные. Относительные приращения объемов штоковерков: Прас – по временным отрезкам, отвечающим образованию прожилков отдельных ассоциаций и их групп, Прст – по стадиям рудоотложения (в % к объему прожилков ассоциаций ранней стадии); Прж – в экзоконтактных и Прэн – в эндоконтактных зонах рудоносных интрузивов по стадиям рудообразования (в % от общего объема рудных прожилков).

Полого залегающий штокверк месторождения Кызата Саукбулакского РП имеет линзовидную форму и локализован в апикальной части грибообразного порфирирового интрузива под толщей мраморизованных доломитов и известняков. Он отнесен к четвертому морфологическому типу, характеризуется наложением в пространстве ареалов развития разновозрастных минеральных ассоциаций, сравнительно небольшим вертикальным размахом оруденения (первые сотни м) при угнетенном развитии надрудных геохимических ореолов, аномально высокой густотой рудных прожилков и жил (в РТ в среднем около 15–20%, а в его центральной части до 60–80% объема пород) и, соответственно, повышенными концентрациями металлов в рудах (рис. 2). Значительная часть прожилков и жил имеет пологое залегание. Для штокверка выявлена *центростремительная* тенденция наращивания от ранней к поздней стадии развития, интерпретируемая как последовательное заполнение трещинного и порового пространства минеральным веществом в направлении вниз (вглубь порфирирового интрузива) от контактов с вышележащей карбонатной толщей. Основным механизмом образования рудовмещающих трещин, судя по внутриинтрузивному положению и строению штокверка, был контракционный.

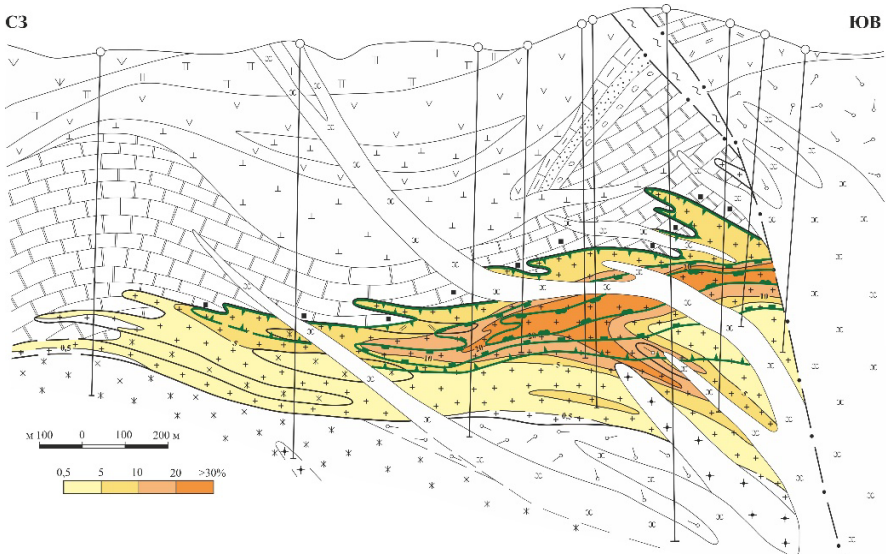


Рисунок 2 – Рудоносный штокверк месторождения Кызата. Распределение объемов рудных прожилков (в % от объема вмещающих пород) в разрезе по профилю VI. Зелеными контурами показано рудное тело по бортовым содержаниям 0,2%, 0,5 % и 1,0% [Звездов, 2021]

Выявленные различия в строении изученных штокверков отражают разные *структурно-петрофизические обстановки* их формирования. Вмещающие их РМС условно можно назвать «открытыми» и «закрытыми» (*подэкранными*). Месторождения Алмалыкского, Коксайского и Актогайского РП, принадлежащие системам *первого типа*, сопряжены с порфирировыми штоками, внедрившимися в породы фанеритовых фаз гранитоидных массивов рудоносных формаций, включая «гибридные», возникшие при ассимиляции карбонатной тощи (Алмалык), и комагматичные вулканиты (Актогай), которые в основном относятся к «упругому» типу сред. Они были благоприятны для

хрупких деформаций, что привело к возникновению крупнообъемных штокверков с отчетливо проявленной минеральной зональностью и сравнительно бедными рудами. Месторождения Саукбулакского (Кызата) и Каульдинского (Нижнекаульдинское) РП *второго типа систем* образовались под мощной толщей малопроницаемых мраморизованных доломитов и известняков, относящихся к *«упруго-пластичным»* средам, выше которых по разрезу залегают экструзивные тела андезидацитов *«упруго-вязкой»* природы. Такие условия в сочетании с недостаточным для прорыва толщи магматическим давлением привели к лакколитоподобной (грибообразной) форме порфировых штоков, внутриинтрузивному положению линзовидных штокверков, совмещению в пространстве разновозрастных метасоматитов и рудообразующих ассоциаций, а в итоге к повышенным концентрациям металлов в рудах. Принципиальные модели эволюции меднопорфировых штокверков в описанных разнотипных системах показаны на рис. 3 и 4.

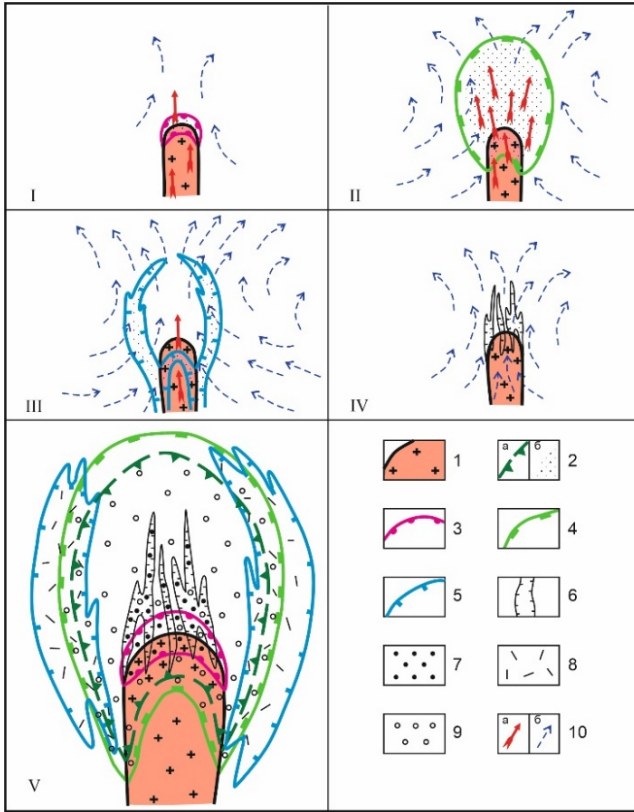
Установленные противоположные тенденции наращивания штокверков в рассмотренных обстановках не противоречат результатам изотопно-геохимических исследований МПМ «открытых» (Актогай и Айдарлы) и «закрытых» (Кызата) РМС [Звездов, 1989], позволившим по изотопному составу кислорода кварца разновозрастных рудообразующих минеральных ассоциаций оценить долю участия вод немагматического происхождения в рудогенезе. Полученные данные свидетельствуют не только о росте метеорной составляющей в гидротермальных растворах к поздним стадиям рудоотложения, но и о существенной разнице в объемах таких вод, вовлеченных в конвекцию во внутренних и периферийных частях изученных разнотипных систем.

Масштабы проявления описанных процессов зависели от петрофизических характеристик вмещающих сред. Понятно, что для штокверков, сформированных под толщей пород *«упруго-вязкого»* деформационного типа (месторождения Эль Теньенте, Рио Бланко–Лос Бронсес, Лос Пеламбрес и др.), главным механизмом образования рудоконтролирующих трещинных каркасов являлся гидроразрыв, что, однако, не исключает контракционные явления в эндоконтактных зонах порфировых интрузивов, со становлением которых сопряжено возникновение многофазных брекчиевых трубок.

Изученные меднопорфировые штокверки принадлежат к «крайним» вариантам («открытому» и «закрытому» (подэкранному) возможных структурно-петрофизических обстановок. Большинство МПМ мира сформировалось в системах с «промежуточными» элементами строения со «средними параметрами» магматических очагов («материнских» плутонов) и рудовмещающих пород, по деформационному поведению относящихся к *«упругому (упруго-хрупкому)» типу сред*.

2. Результаты петрофизического анализа рудовмещающих толщ в комплексе с данными специализированного детального картирования штокверков, микроскопических и аналитических исследований позволили оценить направленность и масштабы изменения физико-механических свойств пород на разных стадиях гидротермально-метасоматических преобразований и формирования рудоносных штокверков.

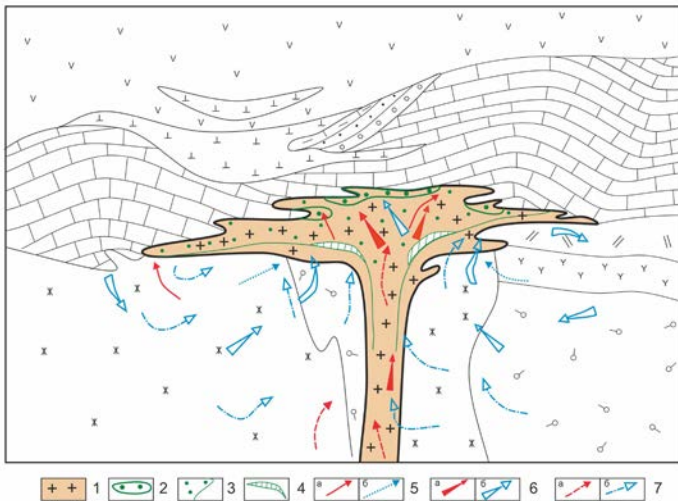
Установлено, что высокотемпературное калиево-кремниевое преобразование и более позднее кислотное выщелачивание пород сопровождаются существенным изменением таких свойств. Наиболее значительное повышение фильтрационных и снижение упруго-прочностных параметров происходит при серицитизации, в меньшей степени хлоритизации. При интенсивном окварцевании изменение названных петрофизических параметров имеет «противоположную» направленность.



I-IV – стадии формирования штокверков: I – ранняя, II – средняя, III – поздняя, IV – завершающая; V – конечная модель.

1 – порфировый интрузив; 2 – границы: оруденелой зоны (а) и областей рудонакопления по стадиям формирования штокверков (б); 3–6 – границы областей образования рудных прожилков на стадиях: I (3), II (4), III (5) и IV (6); 7–9 – среднестатистические значения объемов рудных прожилков различных стадий (в % от объемов вмещающих пород): 7 – 0,2–0,4 (I и IV), 8 – 1,0–1,2 (III), 9 – 1,9–4,1 (II); 10 – предполагаемые пути миграции магматогенных флюидов (а) и активизированных метеорных вод (б)

Рисунок 3 – Модель эволюции рудоносных штокверков МП РМС «открытого» типа (на примере Au-Mo-Cu-порфировых месторождений Алмалыкского РП)



1 – рудоносный порфировый интрузив; 2-4 – ареалы распространения рудных прожилков разных стадий формирования штокверка: 2 – ранней, 3 – средней; 4 – завершающей; 5-7 – направления миграции магматогенных флюидов (а) и активизированных метеорных вод (б) по стадиям: 5 – ранней, 6 – средней, 7 – завершающей

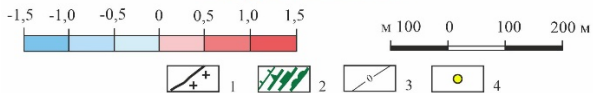
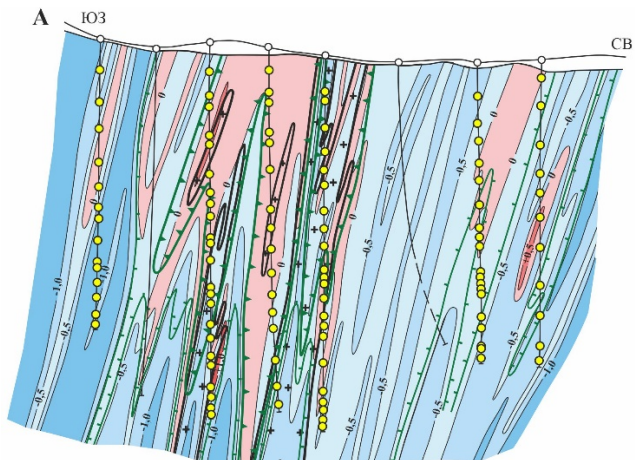
Рисунок 4 – Модель развития штокверка в «подэкранной» структурно-петрофизической обстановке (на примере Au-Mo-Cu-порфирового месторождения Кызата)

Основные породы обладают меньшими емкостными и более высокими упруго-прочностными показателями в сравнении с средними и кислыми. Однако, по мере увеличении степени гидротермального преобразования пород до средней и сильной эти различия нивелируются. Изначально разнотипные породы «приобретают» сопоставимые свойства, что в принципе позволяет выделять рудовмещающие фации метасоматитов по определенным значениям рядовых петрофизических параметров и рассчитанных по ним Кпк и Кап. В качестве дополнительного критерия эти показатели могут быть использованы для оконтуривания минерализованных зон. Из приведенных на рис. 5 в качестве примеров петрофизических разрезов месторождений СЗ Балыкты, Актогай и Кызата также следует, что наиболее контрастные по физико-механическим свойствам вмещающие среды характерны для МПМ с высокими содержаниями меди в рудах (Кызата), а «однородные» – с низкими (Актогай), что подтверждает влияние «экранирующей» карбонатной толщи на рудоконцентрацию.

Раздел 4. ГЕОЛОГО-ГЕНЕТИЧЕСКИЕ МОДЕЛИ МЕДНОПОРФИРОВЫХ СИСТЕМ И МЕСТОРОЖДЕНИЙ

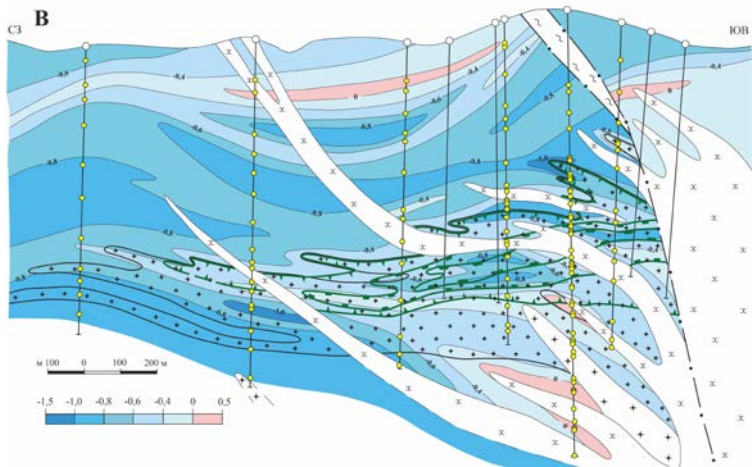
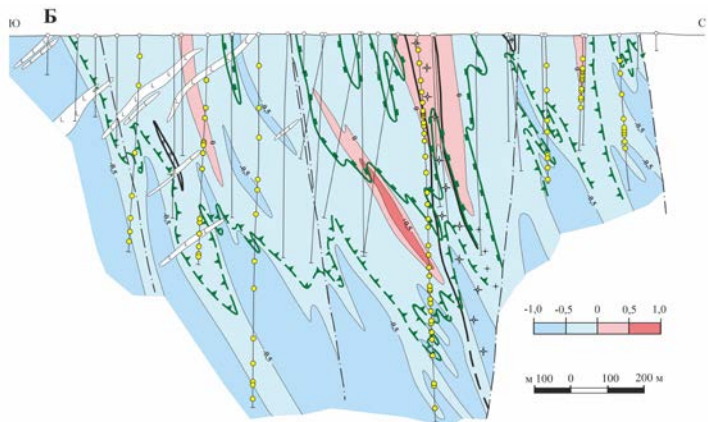
Четвертое защищаемое положение. Строение и параметры РМС, пространственно-временная эволюция гидротермальных потоков в их объеме, рашифицированные с помощью градиентно-векторных концентрационных моделей рудных тел и геохимических ореолов, свидетельствуют о том, что условия формирования меднопорфировых месторождений наиболее полно (количественно) могут быть описаны смешанно-флюидной конвективно-рециклинговой геолого-генетической моделью. Она предполагает двойственную природу транспортирующих агентов (флюидов, растворов) и рудного вещества – магматогенную (мантийную и коровую) и инфильтрационную (метеорную), а в качестве «проводников» тепла и металлоносных флюидов от «материнских» магматических очагов – порфировые интрузивы и брекчиевые трубки. Многооборотная циркуляция гидротермальных растворов, возникшая в тепловом поле интрузивов на средних и поздних стадиях развития РМС, приводила к частичному перераспределению металлов.

Для решения третьей задачи работ по результатам обобщения отечественных и зарубежных публикаций, посвященных генезису МПМ, сопоставлены существующие концепции – ортомагматическая (магматогенно-гидротермальная), рециклинговая и смешанно-флюидная конвективно-рециклинговая. Проанализированы природа рудно-метасоматической зональности месторождений, физико-химические параметры рудообразования, состав гидротермальных растворов, соотношения концентраций и масс металлов в их возможных источниках (магматических очагах и породах интрузивной рамы), растворах и рудных телах, а также данные изотопно-геохимических исследований разновозрастных рудообразующих минеральных ассоциаций. В итоге признано, что наиболее обоснована третья из названных генетических моделей. В ней, наряду с магматическим источником металлоносных флюидов, предполагается участие в рудогенезе метеорных вод, вовлекаемых в многооборотную циркуляцию в тепловом поле интрузивов. Конвекция смешанно-флюидных растворов, доля метеорной составляющей в которых по изотопным данным на поздних стадиях формирования МП РМС достигает 70–90%, приводит, по мнению А.И.Кривцова, И.М.Голованова, Х.Тэйлора, С.Тигли,



1 – рудонсые порфиновые интрузивы; 2 – рудные тела, оконтуренные по разным бортовым содержаниям меди: на СЗ Балыкты – 0,4 и 0,7 %; На Актогайском – 0,2 и 0,5 %; на Кызате – 0,2, 0,5 и 1,0 %; 3 – изолинии Кпк; 4 – петрофизические пробы

Рисунок 5 – Разрезы месторождений в изолиниях комплексного петрофизического коэффициента (Кпк): СЗ Балыкты (А), Актогай (Б), Кызата (В) [Звездов, 2021]

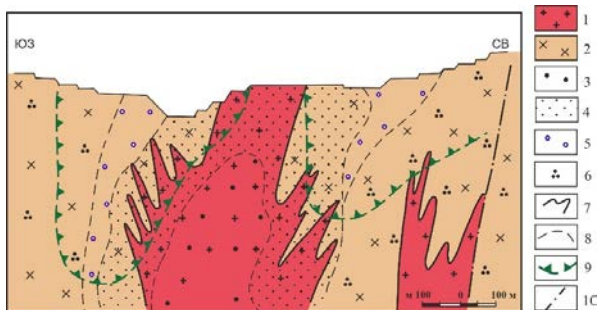


Р.Бина, Д.Нортон, Дж.Найта, Г.Оссандона и других исследователей, к переотложению вещества в зонах рудной разгрузки. Масштабы такого процесса оцениваются неравнозначно. Для их количественной оценки автором на основе параметрических, морфометрических и концентрационных моделей построены градиентно-векторные модели МПМ и РП, элементы и параметры которых использованы для создания модели *меднопорфировой конвективно-рециклинговой рудообразующей системы (МП КРПС)*. В этой модели количественно описана гидротермальная конвекция вокруг остывающих интрузивов, показана роль последней в перераспределении металлов в объеме РТ и заимствовании рудного вещества из вмещающих пород.

Для создания *градиентно-векторных моделей* использованы планы и разрезы типовых МПМ с распределением содержаний меди в рудных телах (РТ), а также планы РП с результатами литогеохимических съемок. Такие модели построены для месторождений Кальмакыр (Узбекистан), Актогай, Айдарлы, Актогайского РП, Бошекуль (Казахстан), Дос Побрес (США). На рис. 6-8 представлена модель первого из названных объектов (в разрезе), на рис. 9 – модель Актогайского РП (в плане поверхности).

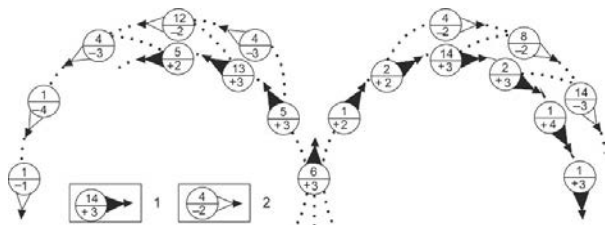
Анализ созданных моделей позволил установить распределение векторов и градиенты изменения концентраций меди в РТ и геохимических ореолах, выявить направления концентрационных потоков, в целом отражающих конфигурацию гидротермальных потоков. В итоге была определена структура геометрической модели МП КРПС (рис. 10), рассчитаны усредненные параметры ее элементов (табл. 3). В системе выделены: *зона рудной загрузки (поглощения)*, охватывающая основной объем конвекционных ячеек, о масштабах которых можно судить по размерам пропиловых ореолов, и *зона рудной разгрузки растворов (рудоотложения)*. Последняя разделена на: *подзону промышленных руд (РТ)*, оконтуриваемую по бортовым содержаниям меди; *подзону подрудной разгрузки*, расположенную между максимально выщелоченными породами (безрудным «кварцевым ядром») и нижней границей РТ; *подзону надрудной разгрузки*, облегающую РТ за их верхними ограничениями (надрудные геохимические ореолы). Первая из подзон разделена на две части поверхностью инверсии концентраций металла (с роста на убывание). В зоне загрузки выделены также безградиентные области (зоны «застоя» растворов), фиксирующие центры конвекционных ячеек. Для упрощения построений и математических расчетов принята миграция этих центров лишь по горизонтали, хотя в реальности они должны «смещаться» вглубь и к оси системы по мере погружения фронта кристаллизации интрузива и уменьшения теплоотдачи.

Построение градиентно-векторных моделей в вертикальных сечениях МПМ позволило выявить ярко выраженный разворот восходящих концентрационных потоков с положительными градиентами в нисходящие с отрицательными, что подтверждает реальность конвекции растворов в гидротермальных рудообразующих системах (ГРС). Модели, построенные в плане поверхности РП, дали возможность оконтурить упомянутые зоны и подзоны МП КРПС, расшифровать их строение. В частности, на площади Актогайского РП (см. рис. 9) выделены шесть «гидротермальных» центров, от которых по радиусам к периферии системы расходятся концентрационные потоки. Отчетливо выраженные инверсионные границы отделяют площади положительных и отрицательных градиентов изменения содержаний металла. Первые совпадают с зонами раннего калиево-кремниевого изменения пород, вторые – с зонами кислотного выщелачивания и пропиловитизации. Все эти центры «фиксируют» в разной степени



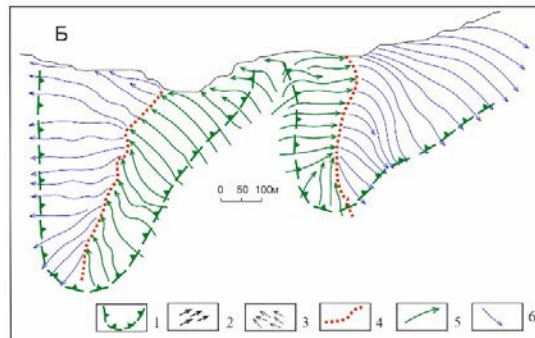
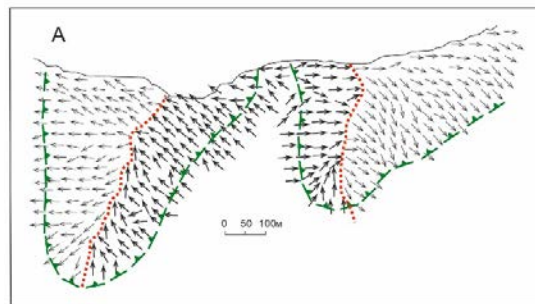
1 – рудоносные гранодиорит-порфиры; 2 – породы интрузивной рамы: сиенито-диориты и диориты; 3–6 – метасоматические зоны: 3 – кварцевая, 4 – кварц-биотит-кашлишпатовая, 5 – кварц-серicitовая, 6 – пропилитовая; 7 – контакты пород; 8 – границы метасоматических зон; 9 – контур рудного тела по бортовому содержанию меди 0,3 %; 10 – разлом

Рисунок 6 – Геологический разрез месторождения Кальмакыр, Узбекистан [Кривцов, Звездов, Мигачев, Минина, 2001]. Составлен с использованием данных И.М.Голованова [Голованов и др., 1988]



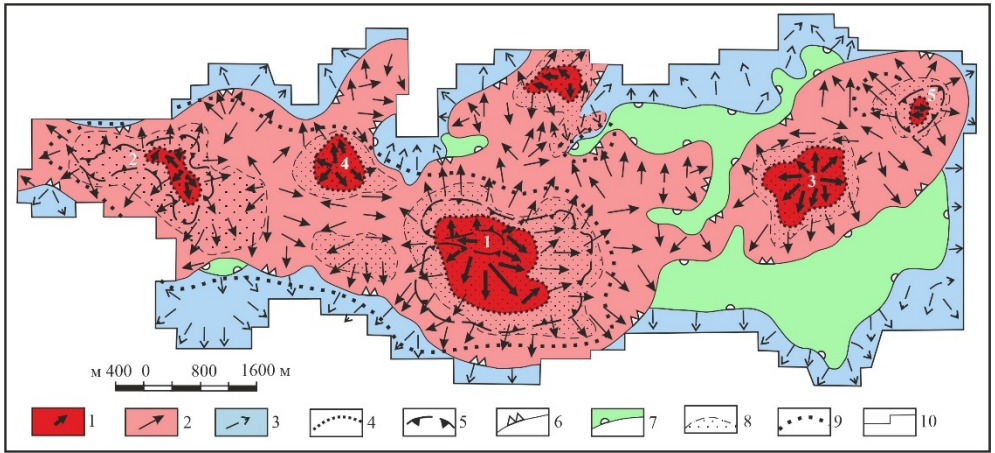
Ориентировка векторов: 1 – положительных, 2 – отрицательных. Цифры в кружках: в числителе – доля векторов в %, в знаменателе – градиенты концентраций меди в $n \cdot 10^{-2} \%$ на 100 м

Рисунок 8 – Полигональная градиентно-векторная диаграмма концентрационных потоков в разрезе месторождения Кальмакыр, Узбекистан [Кривцов, Звездов, Мигачев, Минина, 2001]



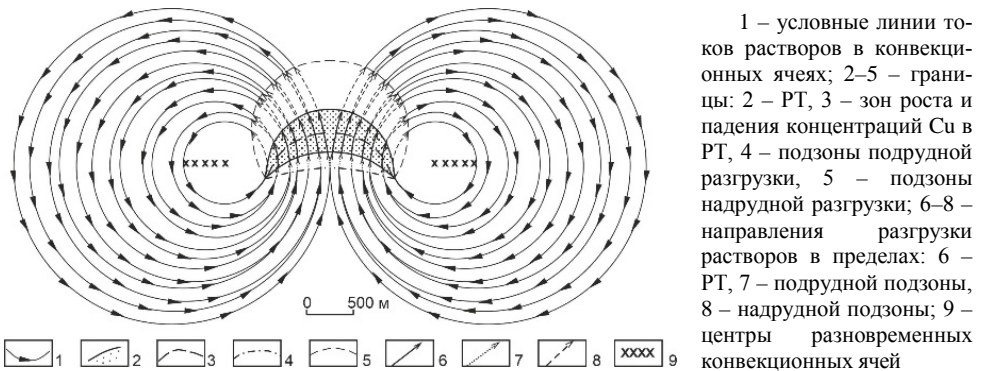
1 – контур промышленного рудного тела; 2–3 – ориентировки векторов градиентов концентраций меди: 2 – по направлению возрастания концентраций, 3 – по направлению убывания концентраций; 4 – линии инверсии концентрационных потоков; 5–6 – направления концентрационных потоков: 5 – с ростом концентраций меди, 6 – с убыванием концентраций меди

Рисунок 7 – Распределение векторов изменения концентраций меди (А) и структура концентрационных потоков (Б) в разрезе месторождения Кальмакыр, Узбекистан. [Кривцов, Звездов, Мигачев, Минина, 2001]



1–2 – вектора и области роста (1) и убывания (2) концентраций меди в зонах рудной разгрузки; 3 – вектора и области убывания концентраций меди в зонах поглощения; 4 – линии инверсии концентрационных потоков; 5 – контуры промышленных рудных тел; 6 – границы зон рудной разгрузки; 7 – границы зон застоя; 8 – метасоматические изменения во внутренних частях меднопорфировых систем; 9 – контуры пиритовых ореолов; 10 – контур площади геохимической съемки по вторичным ореолам рассеяния меди. Месторождения: Актогай (1), Айдарлы (2), Кзылкия (3); рудопроявления: Промежуточный (4) и Восточный (5)

Рисунок 9 – Актогайское рудное поле, Казахстан. Схема концентрационных потоков в плане поверхности [Кривцов, Звездов, Мигачев, Минина, 2001]



1 – условные линии токов растворов в конвекционных ячейках; 2–5 – границы; 2 – РТ, 3 – зон роста и падения концентраций Cu в РТ, 4 – подзоны подрудной разгрузки, 5 – подзоны надрудной разгрузки; 6–8 – направления разгрузки растворов в пределах: 6 – РТ, 7 – подрудной подзоны, 8 – надрудной подзоны; 9 – центры разновременных конвекционных ячеек

Рисунок 10 – Идеализированная геометрическая структура МП КРПС в поперечном разрезе [Кривцов, Звездов, Гирфанов, Егорова, 1995]

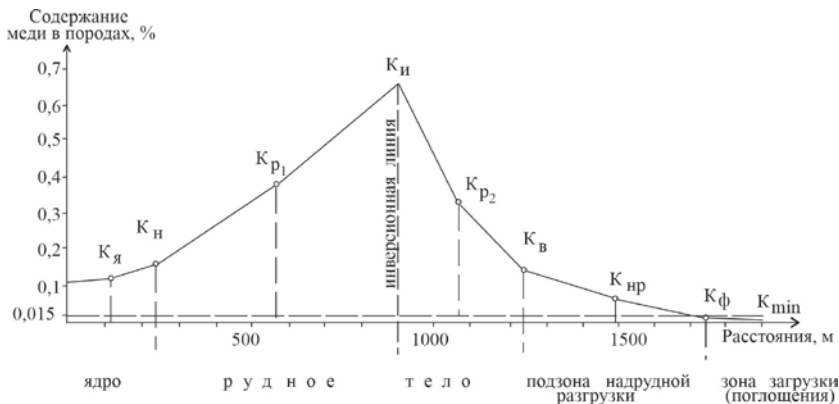
эродированные месторождения либо рудопроявления, сопряженные со штоками гранодиорит-порфиров – апофизами гранитоидного массива на глубине. Наличие нескольких центров гидротермальной активности наряду с петрофизически «однородной» рудовмещающей средой явилось одной из причин низких содержаний металлов в рудах месторождений Актогайского РП (МПМ «мирового» класса обычно ассоциируют с отдельными крупными порфировыми интрузивами – центрами соответствующих РМС).

Таблица 3 – Расчетные размеры элементов геометрической модели МП КРРС [Кривцов, Звездов, Гирфанов, Егорова. 1995]

| Элементы модели | Размеры | Радиус, 10 ² м | Высота, 10 ² м | Длина, 10 ² м | Площадь, 10 ⁴ м ² | Объем, 10 ⁶ м ³ | Масса, 10 ⁴ т при плотности 3 т/м ³ |
|--|---|------------------------------|------------------------------|-----------------------------|--|--|--|
| Рудное тело (РТ) | В плане | 6 | - | 37,68 | 113,04 | - | - |
| | В разрезе | 6 | 4 | - | 38,58 | - | - |
| | В пространстве | 6 | 4 | 37,68 | - | 334,93 | 1004,8 |
| | Верхнее ограничение в разрезе | 6 | 6 | 18,84 | 56,52 | - | - |
| | Линия инверсии содержаний в разрезе | 7,75 | 3,5 | 16,05 | 37,23 | - | - |
| | Нижнее ограничение в разрезе | 9,5 | 2 | 13,25 | 17,94 | - | - |
| | Запасы руды | - | - | - | - | - | 1004,8 |
| | Запасы меди при содержаниях: среднем 0,6 %, бортовом 0,1 % | - | - | - | - | - | 6,03 |
| Подзона надрудной разгрузки (ПНР) | В плане | 7,5 | - | 47,1 | 176,62 | - | - |
| | В разрезе | 7,5 | 6 | - | 98 | - | - |
| | В пространстве | 7,5 | 6 | 47,1 | - | 1035,0 | 3105 |
| | Верхнее ограничение в разрезе | 7,5 | 12 | 34,0 | 154,5 | - | - |
| | Нижнее ограничение в разрезе | 6 | 6 | 18,84 | 56,52 | - | - |
| | Путь разгрузки (макс.) | - | 6 | 7 | - | - | - |
| | Запасы руды | - | - | - | - | - | 3105 |
| | Запасы меди при $K_{ср}=0,05$ % | - | - | - | - | - | 1,55 |
| Подзона подрудной разгрузки (ППР) | От опорного основания до нижней границы рудного тела | 6 | 2 | 37,68 | 113,04 | 117,23 | 351,69 |
| | Запасы меди при $K_{ср}=0,05$ % | - | - | - | - | - | 0,176 |
| Конвекционная ячей в разрезе (одна сторона системы) | Внешнее ограничение круговое | 15 | 30 | 94,2 | 706,5 | - | - |
| | Внешнее ограничение эллиптическое | 15 | 36 | 106,2 | 989,1 | - | - |
| | Зона загрузки (без ПНР, РТ, ППР) для кругового ограничения | 15 | 30 | 80,2 | 629,2 | - | - |
| | Зона загрузки (без ПНР, РТ, ППР) для эллиптического ограничения | 15 | 36 | 92,2 | 911,8 | - | - |
| Система ячеей в проекции (план) | Внешнее ограничение | 30 | - | 188,4 | 2826 | - | - |
| | Тор как совокупность ячеей | 15 | - | 94,2 | 706,5 | - | - |
| | Ось центров внутреннего ограничения | 7,5 | - | 47,1 | 176,6 | - | - |
| | Максимальное сечение нисходящего потока – в пространстве | 29,6 | - | 21 | 2751,7 | - | - |
| | Зона загрузки (без ПНР, РТ, ППР) | 30 | 30 | - | 2751,7 | 65065,1 | 195,2 |
| | Максимальное сечение нисходящего потока | 9 | 14 | 56,52 | 791,3 | - | - |
| | Максимальное сечение горизонтального потока | 9 | 14 | 56,52 | 791,3 | - | - |
| | Запасы меди при кларке в гранодиоритах 0,01 % | - | - | - | - | - | 19,53 |
| Зона разгрузки (ЗР) | Зона разгрузки в целом (сумма ПНР, РТ, ППР) | - | - | - | - | 1481,2 | 4,5 |
| | Суммарные запасы меди в зоне разгрузки: при $K_{ср}=0,6$ % | - | - | - | - | - | 7,76 |
| | Разность запасов меди в зонах загрузки и рудной разгрузки при $K_{ф}=0,01$ % для $K_{ср}=0,6$ % | - | - | - | - | - | 11,77 |
| | Доля запасов меди в зоне разгрузки от запасов зоны загрузки при $K_{ф}=0,01$ % для $K_{ср}=0,6$ % | - | - | - | - | - | 39,7 |

Примечание. Содержания меди: $K_{ф}$ – фоновое, $K_{б}$ – бортовое, $K_{ср}$ – среднее.

С использованием среднестатистических (по изученным объектам) значений содержаний меди (K_{\min} , $K_{\text{я}}$, $K_{\text{н}}$, $K_{\text{в}}$, $K_{\text{и}}$, $K_{\text{р1}}$, $K_{\text{р2}}$, $K_{\text{н}}$ и $K_{\text{ф}}$) по «типovým» концентрационным линиям построены графики модельного распределения содержаний меди в горизонтальных сечениях подрудной, рудной и надрудной подзон зоны разгрузки (ЗР) и зоны поглощения (ЗП) МП КРРС. Из усредненного графика (рис. 11) следует, что градиенты изменения концентраций металла в ЗР в сравнении с фоновыми достигают нескольких сотен процентов, а на инверсионных границах 800–1000 %. В абсолютном выражении по рудному полю в целом они в среднем равны 0,014 % меди на 100 м.



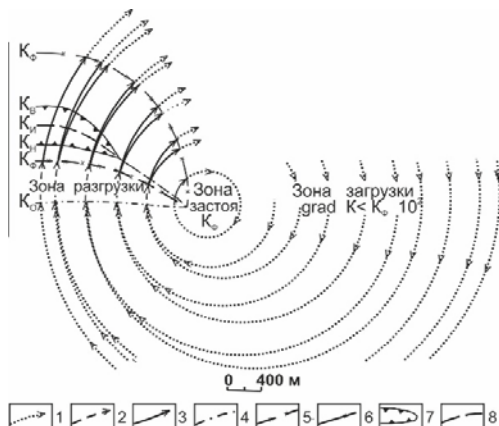
Значения содержаний меди: K_{\min} – минимальное в зоне загрузки; $K_{\text{ф}}$ – фоновое в породах интрузивной рамы; $K_{\text{н}}$ – бортовое на нижней границе рудного тела; $K_{\text{в}}$ – бортовое на верхней границе рудного тела; $K_{\text{и}}$ (K_{max}) – максимальное на инверсионной границе зон роста и падения концентраций; $K_{\text{р1}}$ – среднее в зоне положительных градиентов; $K_{\text{р2}}$ – среднее в зоне отрицательных градиентов; $K_{\text{нр}}$ – среднее в зоне надрудной разгрузки; $K_{\text{я}}$ – среднее в подрудной «ядерной» зоне

Рисунок 11 – Актогайское рудное поле, Казахстан. Усредненный график модельного распределения содержаний меди в горизонтальном сечении зон разгрузки и поглощения МП КРРС [Кривцов, Звездов, Мигачев, Минина, 2001]

Поперечные размеры ЗР на Актогайском РП варьируют от 600–800 м на рудопроявлениях до 2,5–3,0 км на месторождениях. Площадь ЗР Актогайской системы – 12,63 км², Айдарлинской – 9,59 км². Исходя из размеров пропиловых ореолов МПМ и данных литогеохимической съемки масштаба 1:50 000 размеры ЗП можно оценить в первые десятки км². Установлено, что ЗП соседствующих систем могут представлять собой узкие (первые сотни метров) области субвертикально направленных потоков. Нередко между ЗР граничащих «взаимовлияющих» систем отмечаются обширные безградиентные поля.

Градиенты изменения концентраций Cu по потокам, рассчитанные по изученным объектам, составляют 0,1–0,3 % на 100 м. По горизонтали (между субвертикальными ветвями потоков) они в 2–5 раз ниже. Для анализа распределения концентраций металла в ЗП построена обобщенная модель МП КРРС, в которой для узловых (критических) точек оценены содержания металла (рис. 12). В этой модели диаметр конвекционных ячеек, исходя из размеров концентрационных потоков исследованных систем, колеблется от 1300 до 2100 м. Ветвление потоков при изменении их направлений сопровождается увеличением положительных градиентов пропорционально росту числа этих направ-

лений. На нисходящих ветвях наблюдается расширение потоков при почти постоянном значении градиентов убывания концентраций, значительно меньшем, чем увеличение положительных градиентов на восходящих ветвях.



Линии тока растворов в конвективной ячее: 1 – в зоне загрузки, 2 – в зоне разгрузки при концентрациях меди от K_0 до $K_ф$, 3 – то же, при концентрациях меди больше $K_ф$; 4 – границы зоны разгрузки; 5 – ограничение подзоны подрудной разгрузки; 6 – верхнее ограничение подзоны надрудной разгрузки; 7 – границы рудного тела; 8 – линия инверсии содержания меди

Рисунок 12 – Обобщенная модель МП КРРС (правая часть от оси системы) [Кривцов, Звездов, Гирфанов, Егорова, 1995]

Для участков конвекционных ячее, в пределах которых локализованы промышленные руды с содержаниями меди более 0,2–0,3 %, характерно стягивание потоков с боков и снизу в узкую стволовую вертикальную зону. Выше восходящий поток расходится в стороны с ветвлением и переходит в нисходящие потоки. Ветвление потоков в верхних частях системы продолжается за границами рудных тел – в область малых концентраций металла (подзону надрудной разгрузки), чем подтверждается эксцентричность строения конвекционных ячеей. Асимметрия каждой из них определяется сочетанием сравнительно небольшой области высоких концентраций меди и градиентов их изменения (вблизи рудоносного штока) с обширной зоной ветвящихся восходящих и нисходящих потоков с низкими концентрациями меди и минимальными значениями градиентов на удаленных флангах системы. Ширина подзоны надрудной разгрузки на Актогайском рудном поле в горизонтальном срезе МП РМС от 420 до 2750 м, что составляет 0,33–2,15 радиуса рудного тела, а среднее значение градиентов убывания концентраций меди – 140 г/т. На месторождении Бошекуль ширина этой подзоны варьирует между 360 и 4080 м при градиенте падения концентраций меди в среднем 128 г/т на 100 м.

Изложенное имеет принципиальное значение для объяснения ряда особенностей строения меднопорфировых систем. Безрудные кварцевые ядра подрудных зон МПМ, в соответствии с моделью, образовались в области стволового субвертикального потока с наибольшими скоростями течения растворов, которые выносили медь и другие металлы на верхние уровни РМС. Расхождение потоков в верхней ее части допускает наличие участков, резко обедненных металлом. Такие «безрудные окна» внутри рудного тела хорошо выражены на месторождении Сьеррита-Эсперанца, США [West, Aiken, 1983].

Эксцентричность конвекционных ячеей – сочетание широких периферийных зон потоков со сравнительно узкими околотрузивными и стволовыми – геологически подтверждается резким преобладанием площадей пропиловых ореолов над площадями биотит-калишпатовой (либо биотитовой), филлизитовой и аргиллизитовой

товой зон, в которых сосредоточены промышленные руды. При таком строении конвекционных ячей скорости потока растворов во внешних и внутренних частях должны существенно различаться. Обобщенная количественная модель МП КРРС допускает возможность скачков их градиентов с двух-трехкратным увеличением и спадом. Поскольку эти перепады приурочены к участкам изменений ориентировки потоков и их ветвления, логично допустить, что они также связаны с изменениями скоростей потока при переходе от относительно узких стволовых зон к расходящимся и разделяющимся ветвям потока. В зоне загрузки (поглощения) не наблюдаются высоких значений градиентов концентраций меди в породах, вследствие чего они могут даже не отражаться в результатах геохимических съемок.

По параметрам созданной модели МП КРРС и установленному распределению концентраций меди в ее объеме (табл. 4) А.И.Кривцовым (1996, 2001) рассчитан баланс масс металла и необходимых для его переноса растворов для разных частей системы. Результаты расчетов, выполненных с учетом возможной проницаемости пород и растворимости меди (от 0,5 до 5 г/т в современных геотермальных системах), подтвердили возможность заимствования, по крайней мере, части рудного вещества (от 40 до 80 %) из интрузивной рамы с его последующим переотложением в зоне рудной разгрузки при условии вовлечения в многооборотную ($n \cdot 10^3$ оборотов) конвекцию вокруг порфировых интрузивов (источников тепла) вод немагматического происхождения.

Таблица 4 – Среднестатистические градиенты содержаний меди и их соотношения в метасоматических зонах изученных МПМ [Кривцов, Звездов, Гирфанов, Егорова, 1995]

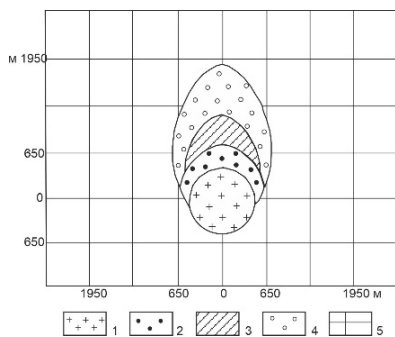
| Метасоматиты | Характерные рудные минералы | Элементы | Средние градиенты содержаний меди на 100 м, усл. ед. (при $K_{\phi}=1$) | Содержания меди, усл. ед (при $K_{\phi}=1$) |
|----------------------------|-----------------------------|----------|--|--|
| Пропилиты | Пир | Ag Au | $-(0,01 \div 0,04)$ | $K_3=0,08$ $K_{\phi}=1$ |
| | Пир, Сфал, Гал | Zn Pb | $-(0,05 \div 1,00)$ | – |
| Аргиллизиты | – | – | – | $K_n=10$ |
| Кварц-серицит-хлоритовые | Пир, Хп, Мол | Cu | $-(30 \div 40)$ | – |
| | Борн, Хкз | Mo | | $K_n=100$ |
| Кварц-биотит-калишпатовые | Хп, Мол, Борн | Au | $20 \div 50$ $4 \div 5$ | $K_n=10$ |
| Подрудное «кварцевое ядро» | Мгт | Sn W | $0,10 \div 0,15$ | $K_{\phi}=1$ $K_0=0,4 \div 0,6$ |

Примечание. Содержания меди в породах: K_0 – на нижней границе зоны разгрузки; K_{ϕ} (фоновое) – на нижней границе подзоны подрудной разгрузки и верхней границе подзоны надрудной разгрузки; K_n – на нижней границе рудного тела; K_i – на линии инверсии содержаний меди; K_b – на верхней границе рудного тела; K_3 – в зоне загрузки; Борн – борнит, Гал – галенит, Мгт – магнетит, Мол – молибденит, Пир – пирит, Сфал – сфалерит, Хкз – халькозин, Хп – халькопирит

Сопоставление разработанной геолого-генетической модели МП КРРС с гидродинамическими моделями природных высокотемпературных гидротермальных резервуаров (ВГР), детально изученных как источники энергии [Кирюхин и др., 1991; Lipman, 1977; Donaldson, Grant, 1981; Thomas, Chapman, 1981], и расчетными, в т.ч. компьютерными, моделями тепломассопереноса (Волчков и др., 1997; Савилкин, 1997; Гричук и др., 1998; Norton, 1983 и др.), также показали реальность выполненных построений.

Оценка влияния глубины залегания порфировых интрузивов на циркуляцию растворов и рудонакопление дана в расчетной модели В.С.Звездова и В.С.Тихонова [1995].

Для наклонно залегающего магматического тела, имеющего в вертикальном сечении сферическую форму (рис.13), по принятым петрофизическим параметрам зон и подзон МП КРРС (табл. 5) вычислены и построены тепловые поля, линии токов растворов со значениями скоростей их фильтрации, изоконцентраты осаждающегося (в зоне разгрузки) либо выщелачивающегося (в зоне загрузки) металла на периоды 75 000 и 150 000 лет остывания интрузива, находящегося на глубинах 2 и 3 км. В итоге установлено, что скорости течения растворов и концентрации меди в названных зонах на глубине 2 км соответственно в 2,5 раза и на 2–3 порядка превышают их значения на глубине 3 км (рис. 14), что свидетельствует о том, что с ростом глубины гидротермальная конвекция «затухает» и рудонакопление практически не происходит.



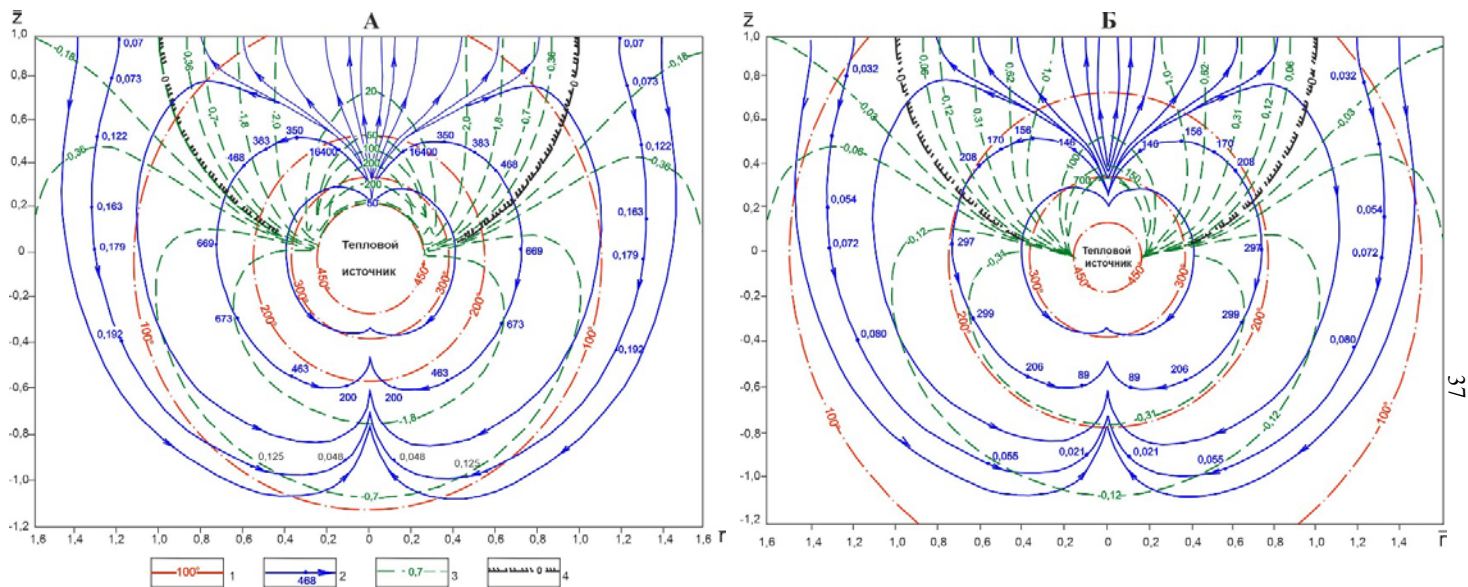
1 – магматическое тело — источник тепла; 2-4 – зона рудной разгрузки МП КРРС: 2 – подзона подрудной разгрузки, 3 – рудное тело, 4 – подзона надрудной разгрузки; 5 – зона рудной загрузки (рудосбора)

Рисунок 13 – Геометрия системы, принятая для расчета параметров теплопереноса в МП КРРС [Звездов, Тихонов, 1995]

Таблица 5 – Петрофизические характеристики зон и подзон расчетной модели меднопорфировой рудообразующей системы [Звездов, Тихонов, 1995]

| Зоны и подзоны МП КРРС | Петрофизические параметры | | |
|-----------------------------|---------------------------|---------------------------------|-------------------|
| | Плотность, г/см | Эффективная пористость, min/max | Проницаемость, md |
| Подзона подрудной разгрузки | 2,65 | $\frac{0,65}{1,40}$ | 3,0 |
| Подзона рудной разгрузки | 2,60 | $\frac{0,75}{2,50}$ | 10,0 |
| Подзона надрудной разгрузки | 2,70 | $\frac{0,39}{1,00}$ | 5,0 |
| Зона загрузки (поглощения) | 2,75 | $\frac{0,28}{0,50}$ | 1,0 |

Выполненные построения ни в коей мере «не отрицают» роль магматических очагов как главного источника рудного вещества, что не исключает возможность его перераспределения циркулировавшими вокруг интрузивов растворами. Об этом, в частности, свидетельствуют характерные для многих МПМ андезитовидных поясов зоны эндогенного обогащения руд (Чукикамата, Бьютт и др.) и поздние минеральные ассоциации с полиметаллами на флангах меднопорфировых штоков (Бингхэм, Алмалык и др.), которые образовались на стадии кислотного выщелачивания пород с заимствованием вещества из регенерированных Pb-Zn стратиформных месторождений фундамента ВПП. Примечательно, что на изученном месторождении Кызата Саукбулакского РП Алмалыкского РР, локализованном в «подэкранной» обстановке, где условий для ширококомасштабной гидротермальной конвекции с участием разогретых метеорных вод не было, поздние полисульфидные (с Au и Ag) рудообразующие ассоциации, столь характерные для объектов Алмалыкского РП, практически отсутствуют.



1 – изотермы (°C); 2 – линии токов растворов и значения скоростей их фильтрации (мм/год); 3 – изоконцентраты Cu во вмещающих породах ($n \cdot 10^{-2} \%$ для рис. 14, А и $n \cdot 10^{-4} \%$ для рис. 14, Б); положительные – в зоне разгрузки растворов (рудоотложения), отрицательные – в зоне загрузки растворов (выщелачивания); 4 – граница раздела названных зон, соответствующая нулевой изоконцентрате металла; r и z – относительные расстояния теплового источника теплового источника по горизонтали (r/H) и вертикали (z/H) от центра системы координат OXYZ; H – глубина залегания теплового источника

Рисунок 14 – Расчетная модель тепловых полей, гидротермальных потоков и распределения концентраций металла вокруг сферического теплового источника, залегающего на глубинах: 2 км (А) и 3 км (Б) после 75 000 лет остывания [Звездов, Тихонов, 1995]

Крупномасштабная гидротермальная конвекция на средних и поздних стадиях развития РМС (в период образованием филлизитов и аргиллизитов, а на периферии систем низкотемпературных фаций пропилитов и пиритовых ореолов) сопровождается частичным перераспределением вещества ранее образованных (на высокотемпературной К-кремневой стадии) продуктивных минеральных ассоциаций. Повышенные концентрации металлов возникают за счет телескопирования и «интегрального» рудонакопления в серии последовательных обменов вод, чем, в частности, объясняется столь характерная для меднопорфировых штокверков удаленность рудных столбов от контактов рудоносных порфировых интрузивов. Особенности функционирования МП КРРС, энергетическими центрами которых являются порфировые интрузивы, а в качестве источников растворов и металлов выступают как глубинные магматические очаги, так и вмещающие породы, обуславливают полигенность и полихронность рудообразования в значительных по объему участках земной коры.

Приведенные в работе материалы свидетельствуют о том, что *конвективно-рециклинговая генетическая модель МПМ* наиболее полно отвечает современному уровню накопленных знаний. Она обоснована многочисленными изотопно-геохимическими данными, результатами градиентно-векторного анализа распределения концентраций меди в рудных телах и рудных полях, расчетами и компьютерным моделированием тепломассопереноса в МП РМС, гидродинамическим моделированием флюидных потоков, изучением ВГР, являющихся (по гидродинамическому режиму функционирования) современными аналогами таких систем. Для совершенствования разработанной модели необходима оценка баланса масс растворов и металлов на отдельных стадиях формирования МП РМС, а также компьютерное моделирование гидротермальной конвекции и рудоотложения с учетом петрофизической гетерогенности рудовмещающих сред и циркуляции растворов по системам мелкой трещиноватости (в описанных моделях учтена только фильтрация вод в средах разной проницаемости; для оценки циркуляции по трещинам необходим несравненно более сложный математический аппарат вычислений).

Раздел 5. ПРОГНОЗНО-ПОИСКОВЫЕ МОДЕЛИ МЕДНОПОРФИРОВЫХ РУДНЫХ РАЙОНОВ И УЗЛОВ ВУЛКАНОПЛУТОНИЧЕСКИХ ПОЯСОВ ВОСТОКА РОССИИ

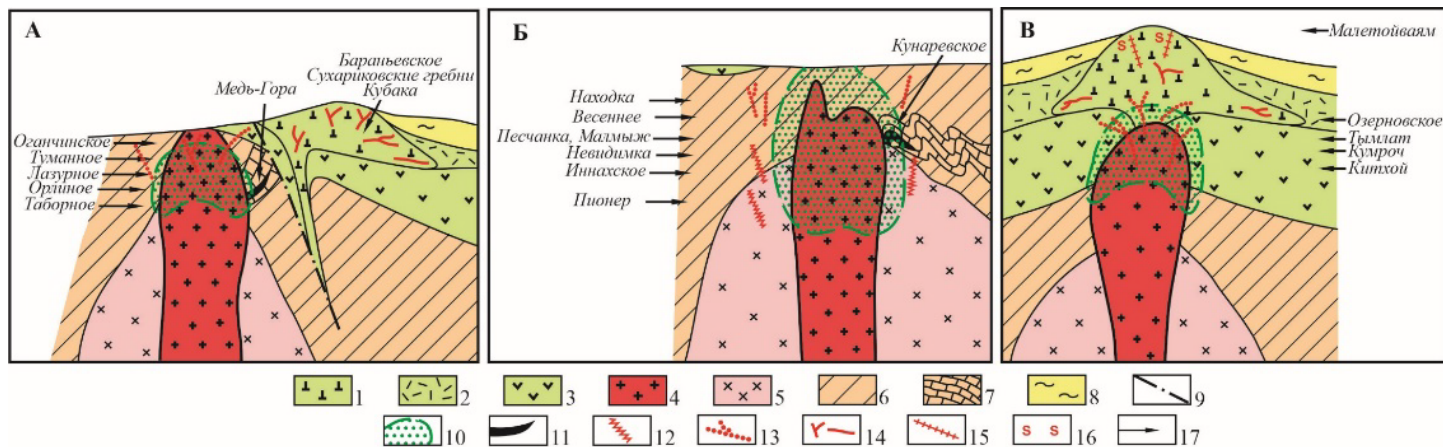
Пятое защищаемое положение. Комплексные меднопорфировые РМС по масштабам эквивалентны рудным районам и узлам. Их внутренние и фланговые части с собственно меднопорфировыми, скарновыми и жильными месторождениями меди, полиметаллов, золота, серебра, а также внешние с эпitherмальными стратонидными, жильными и жильно-прожилковыми золоторудными и золото-серебряными месторождениями могут рассматриваться как рудные поля. Закономерное расположение разнотипных продуктов рудогенеза в объеме таких РМС допускает возможность прогноза их недостающих элементов при наличии любого из них, что учтено в разработанных прогнозно-поисковых моделях потенциальных рудных районов (ППР) и узлов (ПРУ). На их основе проведено прогнозно-металлогеническое районирование восточных регионов России. В металлогенических зонах ряда минерагенических провинций выделены и оконтурены ППР и ПРУ, оценена их перспективность на меднопорфировые и сопряженные руды.

Комплексные МП РМС по масштабам (сотни км²) эквивалентны рудным районам (РР) и узлам (РУ). Они могут рассматриваться как совокупности вулканогенных и плутоногенных формаций и ассоциирующих с ними рудных месторождений, образовавшихся на разных глубинах в ходе эволюции единых магматических очагов. Во внутренних и фланговых частях таких систем локализованы гипабиссально-субвулканические Cu-Мо-, Au-Мо-Cu- и Au-Cu-порфиновые, Cu- и Pb-Zn-скарновые (с Au и Ag), Au-порфиновые, жильные золото-кварцевые и золото-полисульфидные месторождения, а во внешних (периферийных) – близповерхностные золотые и золото-серебряные (HS и IS типов), а также самородной серы. Названные части систем соответствуют рудным полям.

Изучение позиции, магматизма и металлогении КМП РМС в андезитоидных поясах Дальневосточного ФО показало, что их строение зависит от геоструктурных обстановок формирования рудоносной андезит-диорит-гранодиоритовой (иногда с монцитонитидным уклоном) ВПА раннего этапа становления поясов, а рудно-формационная зональность может отличаться от общеизвестной модели Р.Силлитю (2010). По изученным пространственно-временным соотношениям вулканогенных и плутоногенных формаций и связанных с ними проявлений разных РФТ В.С.Звездовым и О.В.Мининой (2010) выделены четыре группы (модели) РМС: *на сочленении выступов фундамента ВПП с вулcano-тектоническими депрессиями (ВТД), в магматогенных поднятиях субстрата ВПП, в вулcano-купольных структурах и «спрессованные» по вертикали системы типа «интрузив под вулканом»*. (В работе приведено описание нижеперечисленных систем каждой из групп).

Наиболее распространены системы *1-й группы*, характеризующиеся отчетливо выраженной латеральной магматической и рудно-формационной зональностью (рис. 15, А), что отличает их от вышеупомянутой модели с доминирующим вертикальным типом зональности. Такие РМС выявлены в Корякско-Центрально-Камчатском (Центрально-Камчатская), Кедонском (Южно-Омолонская), Охотско-Чукотском (Бургачанская, Кавральянская, Чаплинская), Умлекано-Огоджинском (Покровская), Восточно-Сихотэ-Алиньском (Многовершинная, Уктурская и др.) поясах. Установленные для них пространственные соотношения Au-Мо-Cu-порфиновых, золото-полисульфидных и золото-кварцево-жильных проявлений, сосредоточенных в выступах субстрата ВПП, с одной стороны, и эпитермальных золото-серебряных и золото-адуляр-кварцевых месторождений, локализованных в ВТД, с другой, обусловлены сочетанием названных геоструктурных элементов. Широкое распространение вулканитов продуктивной ВПА свидетельствует также об отсутствии значительных сжимающих напряжений на ранних стадиях развития ВПП, т. е. о геодинамических обстановках, не благоприятствовавших возникновению крупнообъемных магматических очагов, необходимых для образования крупных МПМ. Поэтому РМС 1-ой группы перспективны для поисков, прежде всего, эпитермальных благороднометалльных месторождений, что не исключает возможность обнаружения мелких меднопорфиновых объектов в их внутренних частях.

Комплексные РМС *2-й группы* с Cu-порфировыми, золото-кварцевыми и золото-полисульфидными рудами формировались при становлении плутоногенной составляющей продуктивной ВПА в магматогенных поднятиях субстрата ВПП с ограниченным развитием комагматичной вулканогенной формации. Они характеризуются латерально-вертикальной рудно-формационной зональностью на гипабиссальном и субвулканическом уровнях (рис. 15, Б). Такие системы выделены в Курыинском (Баймская



1–5 – рудоносная ВПА: 1–3 – вулканогенные образования андезит-риодацитової формации: экструзивно-субвулканические и экструзивно-лавовые купола дацитов, риодацитов, андезитов, сопровождающиеся золото-серебряными, медно-мышьяковыми и серными проявлениями (1), стратифицированные продукты кислого вулканизма (2), лавы и туфы андезитов, андезибазальтов с предпоясовой континентальной молассой в основании (3); 4–5 – плутогенные образования габбро-диорит-монцит-гранодиоритовой формации: поздние порфировые фазы (штоки и дайки), сопровождающиеся молибден-меднопорфировыми рудами и золото-кварцевыми жилами (4), ранние фазы – равномернозернистые и порфировидные диориты, гранодиориты, сиенито-диориты, монциты (5); 6–7 – разновозрастные структурно-вещественные комплексы субстрата ВПП: метаморфические, терригенные, вулканогенные, плутогенные (6), карбонатные (7); 8 – перекрывающие вулканогенные толщи; 9 – разрывные нарушения; 10–16 – проявления разнотипной рудной минерализации РМС: молибден-меднопорфировой, в том числе золотосодержащей (10), медной и полиметаллической скарновой (11), золото-кварцевой (12), золото-полисульфидной (13), золото-серебряной (14), 15 – медно-мышьяковой (энаргит-люционитовой), 16 – самородной серы в апоэффузивных кварцитах; 17 – положение месторождений и рудопроявлений сопряженных рудно-формационных типов в РМС

Рисунок 15 – Основные типы комплексных рудно-магматических систем вулканоплутонических поясов Востока России: А – на сочленении выступов фундамента поясов с вулканотектоническими палеодепрессиями; Б – в магматогенных палеоподнятиях фундамента; В – в вулканокупольных структурах [Звездов, Минина, 2010]

(Екдэжгычская), Иннахская), Западно-Сихотэ-Алиньском (Малмыжско-Болонская), Кедонском (Ольдянская) и Умлекано-Огоджинском (Пионерная) поясах. Они тяготеют к крупным выступам основания перечисленных ВПП – Алучинскому, Среднеамурскому, Омолонскому, Гонжинскому, в «ядрах» которых находятся крупные многофазные плутоны (мощные промежуточные магматические очаги), со становлением которых связано формирование МПМ. В первых двух из названных поднятий находятся самые значительные Au-Mo-Cu-порфировые месторождения России – Песчанка и Малмыжское. Системы данного типа перспективны для обнаружения крупных меднопорфировых и сопряженных золото-полисульфидных и золото-кварцевых жильных месторождений.

КМП РМС 3-й группы сопряжены с вулcano-купольными структурами, сложенными породами рудоносной ВПА в относительно поднятых блоках фундамента ВПП. В центральных частях таких структур обычно размещены плутониты диорит-гранодиоритовой формации, «надстроенные» на близповерхностном уровне экструживно-субвулканическими телами комагматичных андезитов-дацитов-риодацитов, а периферия сложена туфовыми и пирокластическими фациями. Подобная обстановка становления рудоносной ВПА типична для МПМ Андийских поясов. Отличительной чертой РМС данной группы является тесная пространственная сопряженность плутоногенных и вулcanoгенных членов рудоносной ВПА и, соответственно, Mo-Cu-порфировых, Au-Ag-полисульфидных, золото-серебряных и Au-Cu-As (энаргит-люционитовых) руд, размещение которых в объеме систем подчинено вертикальной зональности (рис. 15, В). Такие системы, эквивалентные рудным узлам, выявлены в Олюторско-Восточно-Камчатском (Кумрочская и Авачинско-Китхойская) и Корякско-Центрально-Камчатском (Малетойваямская, Сеэраваямская) ВПП. Они перспективны, прежде всего, для поисков мезотермальных жильных Au-Ag-полиметаллических и эпитеpmальных жильных и стратоидных (Cu)-Au и Au-Ag месторождений HS и IS типов.

Комплексные РМС 4-й группы немногочисленны и по строению наиболее близки к модели «интрузив под вулканом», но отличаются «сжатостью» по вертикали и совмещением разнотипной минерализации (меднопорфировой, медно-мышьяковой, золото-полисульфидной, золото-серебряной) в контурах рудных зон, благодаря чему рудно-формационная зональность отчетливо не проявлена. Такие РМС встречаются во всех рассмотренных геоструктурных обстановках. К ним принадлежит ряд золото-серебряных месторождений, в рудных телах которых кроме благороднометалльных присутствуют медьсодержащие минеральные ассоциации, типичные для МПМ. Среди них: Озерновское месторождение в северном звене Корякско-Центрально-Камчатского ВПП, Многовершинное в Нижнеамурском сегменте Восточно-Сихотэ-Алиньского, Нявленга и Джульетта в тыловой зоне (Балыгычанском поднятии) Охотско-Чукотского пояса. Наложение рудообразующих ассоциаций, типичных для внутренних и внешних частей МП РМС, друг на друга в ограниченных объемах зон рудоотложения, с частичной регенерацией наиболее ранних из них, отразилось в высоких содержаниях Au и Ag. Подобные обстановки благоприятны для поисков благороднометалльных объектов с высокосортными рудами.

В базальтоидных ВПП также выделены комплексные МП РМС: Накхатанджинская и Танюрерская в Удско-Мургалском, Убиенкинская в Оклано-Пенжинском, а в Ирунейско-Кирганикском островодужном поясе с щелочным магматизмом – Хим-Кирганикская с Au-Cu-Fe-оксидным оруденением и более поздним Mo-Cu-порфировым, связанным с становлением андезитоидного Корякско-Центрально-Камчатского ВПП.

Проанализированные геоструктурные обстановки формирования РМС и установленные закономерности размещения разнотипной рудной минерализации в их объемах должны учитываться при ГРР. По известным проявлениям внешних (периферийных) частей систем могут прогнозироваться объекты внутренних, и наоборот. С этой целью были разработаны прогнозно-поисковые модели (ППМ) МП РМС [Звездов и др., 2011], которые использованы при прогнозно-металлогеническом районировании территории ДФО на меднопорфировые и сопряженные руды. В ВПП Охотско-Чукотской, Корякско-Камчатской, Сихотэ-Алиньской и Алдано-Становой минерагенических провинций – андезитоидных: Охотско-Чукотском, Корякско-Центрально-Камчатском, Олюторско-Восточно-Камчатском, Пенжинско-Западно-Камчатском, Западно- и Восточно-Сихотэ-Алиньском, Умлекано-Огоджинском, Хингано-Охотском, Курьинском, Уяндино-Ясачненском, Кедонском, Ханкайском, Колчанском и базальтоидных: Удско-Мургальском и Ирунейско-Кирганинском – с применением формационного и рудно-формационного анализов выделены и оконтурены металлогенические зоны (МЗ), а в их пределах на основе разработанных ППМ комплексных МП РМС перспективные ПРР и ПРУ с ранжированием по рекомендуемой очередности ГРР различного масштаба.

Наиболее перспективными для поисков МПМ признаны Ненкано-Баимская и Хетачано-Кричальская МЗ Курьинского и Западная МЗ Западно-Сихотэ-Алиньского поясов (в первой и третьей расположены крупные Au-Mo-Cu-порфировые месторождения Песчанка и Малмыжское). Остальные МЗ (с проявлениями меднопорфировых и сопряженных руд) отнесены к разряду потенциально перспективных, в том числе: с высоким металлогеническим потенциалом – Центрально-Камчатская, Танюер-Канчаланская, Южно-Омолонская, Северо-Сихотэ-Алиньская; средним – Северо-Камчатская, Кавральянская, Хетачано-Кричальская, Бургачанская, Балыгычанская, Алдома-Этанджинская, Гонжинская; низким – Авачинско-Китхойская, Чаплинская, Эргунейская, Октябрьская, Окча-Уктурская, Дагды-Сандинская, Самаргинская.

В качестве примера прогнозно-минерагенических построений в работе кратко изложены их результаты по Приамурью, Приморью, Сихотэ-Алиню и Камчатке. Приведены карты районирования и металлогенограммы ВПП, планы отдельных МП РМС.

В *Амурско-Сихотэ-Алиньской* провинции выделены Северо-Буреинская, Западная, Восточная и Южная МЗ, охватывающие площади распространения продуктивных ВПА андезит-диорит-гранодиорит-монцитонитового состава раннего этапа становления андезитоидных ВПП. Первые две из этих зон с Малмыжским и Иканским месторождениями наиболее перспективны для поисков новых объектов. В МЗ по ареалам развития рудоносных плутогенных формаций и ассоциирующих с ними меднопорфировых и сопряженных Cu- и Pb-Zn-скарновых и благороднометалльных проявлений оконтурены ПРР и ПРУ, эквивалентные комплексным МП РМС (рис. 16), оценена их перспективность. В Западной МЗ, кроме Малмыжско-Болонского и Арбинского РУ с упомянутыми МПМ, выделены и описаны Пони-Мулинский, Анаджаканский, Кантагарский, Ямтульский и Южно-Комсомольский ПРУ, в Восточной МЗ – Дагды-Коппинский и Окча-Уктурский ПРР, а также Нижнеамурский золоторудный район с перспективами обнаружения меднопорфировых руд на глубоких горизонтах. Все перспективные для поисков МПМ районы и узлы расположены в пределах магматогенных поднятий (выступов фундамента поясов) и характеризуются латеральной рудно-формационной зональностью, т. е. относятся по геолого-структурной позиции к РМС второй группы.

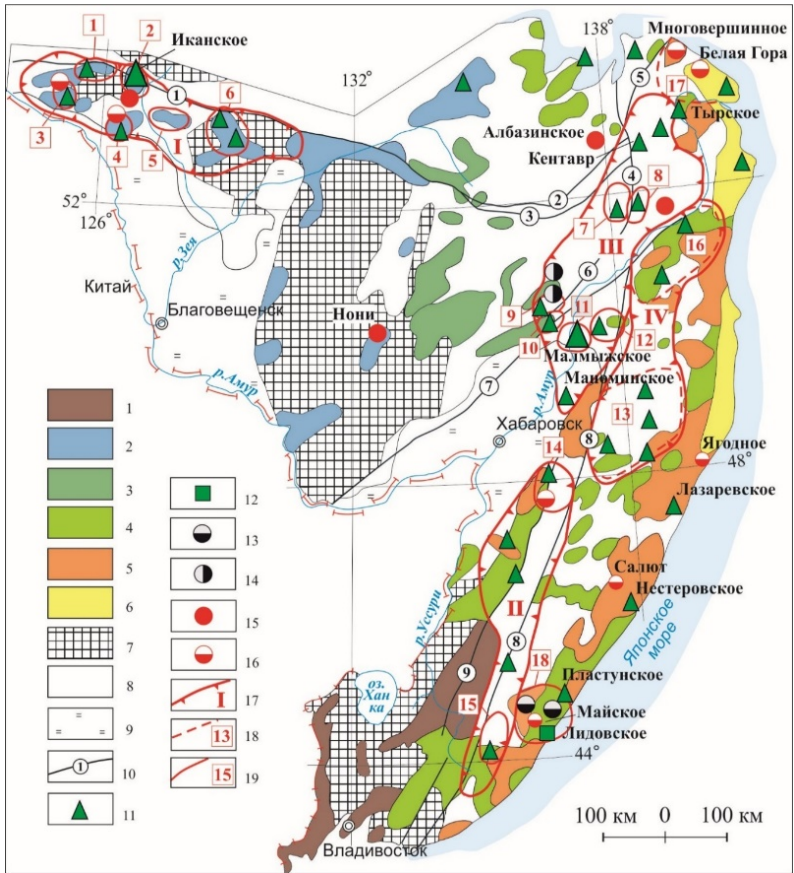


Рисунок 16 – Схема металлогенического районирования южной части территории Дальневосточного федерального округа на меднопорфировое оруденение [Минина, Мигачев, Звездов, 2019]. Составлена на основе Государственных геологических карт и карт полезных ископаемых масштаба 1:1 000 000 и 1:200 000

В *Корякско-Камчатской* провинции в андезитоидных поясах выделены и кратко охарактеризованы МП РМС первых трех из вышеописанных геоструктурных обстановок становления андезит-диорит-гранодиоритовой ВПА, продуктивной на меднопорфировое оруденение. В зависимости от этих обстановок соответствующие ПРР и ПРУ разделены на три группы (рис. 17). К перспективным отнесены Лунтосский узел и группа ПРУ Пылгинской рудной зоны в магматогенных поднятиях с длительным режимом развития (выступах фундамента ВПП, претерпевших многократные циклы тектоно-магматической активности). Находящийся в такой же позиции Крутогоровско-Адриановский ПРУ не перспективен из-за значительного эрозионного среза. Рудные узлы первого и третьего типов (на сочленении поднятий с ВДТ и вулcano-купольных структур) равноценны по перспективности, но прежде всего, для поисков мезотермальных жильных золото-полисульфидных и эпитермальных золото-медно-сульфосолевых (энаргит-люционитовых) и золото-серебряных месторождений NS типа.

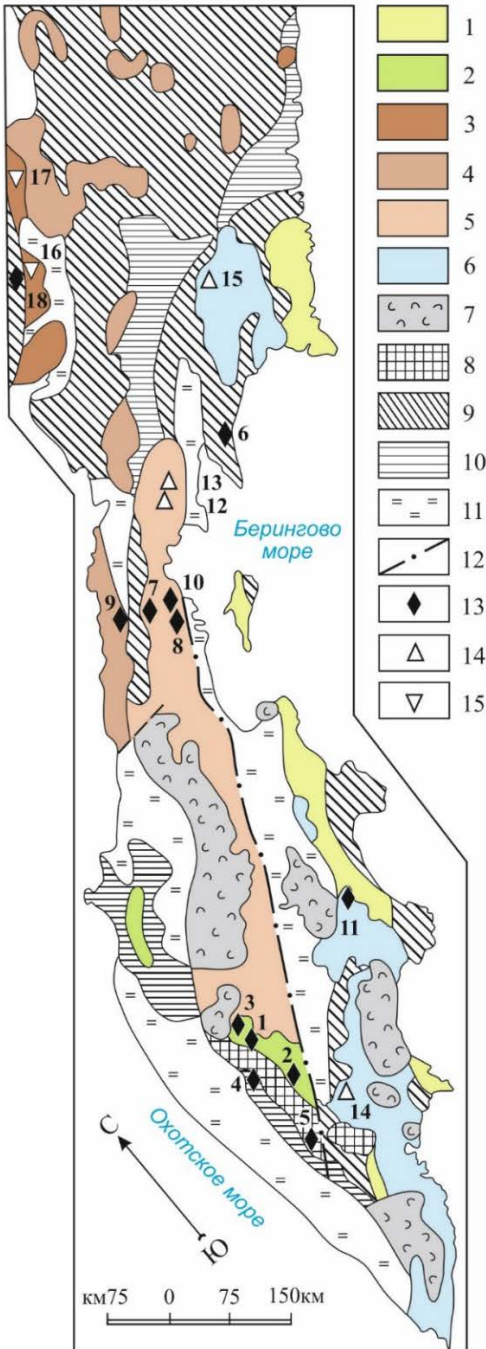
Условные обозначения к рис. 16

1–6 – ареалы развития магматических образований ВПП: 1 – Ханкайского (P_{1-2}), 2 – Умлекано-Огоджинского (K_{1-2}), 3 – Хингано-Охотского (K_{1-2}), 4 – Западно-Сихотэ-Алиньского (K_{1-2}), 5 – Восточно-Сихотэ-Алиньского (K_2-P_1), 6 – Колчанского (P_2-3); 7 – выступы докембрийского кристаллического фундамента Буреинско-Ханкайского сиалического мегаблока (архейские, протерозойские, рифейские гнейсовые, кристаллосланцевые, сланцевые, гранитоидные формационные комплексы), в т.ч. перекрытые палеозойско-раннемезозойским чехлом, с массивами фанерозойских гранитоидов; 8 – терригенные и вулканогенно-терригенные толщи Монголо-Охотской и Сихотэ-Алиньской складчатых систем, нерасчленённые; 9 – крупные кайнозойские впадины; 10 – основные разломы (1 – Южно-Тукурингрский, 2 – Пауканский, 3 – Ниланский, 4 – Лимурчанский, 5 – Дукинский, 6 – Бокторский, 7 – Харпийский, 8 – Центральный, 9 – Арсеньевский); 11–16 – месторождения (крупный знак) и проявления (мелкий знак): 11 – золото-молибден-меднопорфировые, 12–14 – других рудно-формационных типов с промышленным содержанием меди в рудах: 12 – медноскарновые, 13 – свинцово-цинковые скарновые и жильные, 14 – оловорудные касситерит-силикатные, 15–16 – золоторудные: 15 – золото-сульфидно-кварцевые, золото-порфировые, 16 – золото-серебряные, золото-адуляр-кварцевые, золото-кварц-гидрослюдистые; 17–19 – разноранговые минерагенические таксоны меднопорфирового типа: 17 – металлогенические зоны (МЗ) Амурско-Сихотэ-Алиньской провинции: I – Северо-Буреинская, II – Южная, III – Западная, IV – Восточная; 18 – рудные районы и 19 – рудные узлы: *Северо-Буреинской МЗ*: 1 – Игакский, 2 – Арбинский, 3 – Талданский, 4 – Тыгда-Улунгинский, 5 – Умлекано-Ясенский, 6 – Елна-Адамихинский, *Западной МЗ*: 7 – Кантагарский, 8 – Ямтульский, 9 – Южно-Комсомольский, 10 – Анаджаканский, 11 – Мальмыжско-Болонский, 12 – Пони-Мулинский, *Южной МЗ*: 14 – Дурминский, 15 – Соболиный, *Восточной МЗ*: 13 – Дагды-Копинский, 16 – Окча-Уктурский; *за пределами МЗ*: 17 – Нижнеамурский, 18 – Лидовский

В мел-палеогеновом Ирунейско-Кирганикском островодужном базальтоидном ВПП, сложенном трахибазальт-трахиандезит-шонкинитовой ВПА с рудоносной пироксенит-эссексит-шонкинитовой плутоногенной формацией, выделены Хим-Кирганикская и Шаромская РМС с Кирганикским месторождением и рядом проявлений Au-Cu-Fe-оксидного типа. В пределах первой из них присутствуют также Mo-Cu-порфировые проявления, образовавшиеся при становлении габбро-диорит-гранодиоритовой формации (лавкинского комплекса) андезит-диоритовой ВПА неогенового Корякско-Центрально-Камчатского ВПП. Таким образом, эта РМС, которой эквивалентен одноименный РУ, может быть отнесена к числу комплексных полиформационных систем с «унаследованным» типом металлогении.

В целом по Корякско-Камчатской провинции с учётом целого ряда факторов и, прежде всего, экономических и экологических сделан вывод о приоритетности постановки прогнозно-минерагенических работ на золото – на площадях с проявлениями эпitherмальных золотосодержащих медно-мышьяковых с золотом и золото-серебряных руд.

Прогнозно-металлогеническим районированием ВПП Дальневосточного региона России, проведенным на разработанных в ЦНИГРИ методических основах и с учетом созданных моделей комплексных МП РМС, оценены перспективы поисков меднопорфировых и сопряженных руд цветных и благородных металлов. Составлены цифровые специализированные прогнозно-металлогенические карты ДФО России масштаба 1:2 500 000, Магаданской области масштаба 1:1 000 000, Камчатского края масштаба 1:500 000, отдельных МЗ и РР в Амурской области, Чукотского АО и др. субъектов РФ масштаба 1:200 000 – 1:50 000. По наиболее перспективным площадям подготовлены и представлены в Роснедра обоснования для постановки прогнозно-минерагенических и поисковых работ с ранжированием по очередности их проведения, что было учтено при подготовке Перечней объектов ГРР, выполняемых за счет федерального бюджета.



1–7 – вулканоплутонические пояса: 1 – предполагаемый базальтоидный Ачайвайм-Валагинской островной дуги (K_2), 2 – Ирунейско-Кирганикский (K_2-P_1), 3 – Оклано-Пенжинский (P_1-N_1), 4 – Пенжинско-Западно-Камчатский (P_2-N_1), 5 – Корякско-Центрально-Камчатский (P_3-N_{1-2}), 6 – Олоторско-Восточно-Камчатско-Курильский (P_3-N_2), 7 – Камчатско-Курильский современный (N_2^3-Q); 8–10 – фундамент ВПП: 8 – метаморфический гнейсовый и сланцевый (PR и PZ $_2$ -3?) Срединного и Ганальского выступов, 9 – вулканогенный и терригенно-вулканогенный островодужных поясов, океанических структур и окраинных морей, 10 – терригенный, вулканогенно-терригенный флишевых тыловых прогибов, континентальных шельфов; 11 – кайнозойский осадочный чехол (прибрежные и континентальные молассы, рыхлые четвертичные отложения), 12 – Центрально-Камчатский разлом; 13–15 – потенциальные комплексные рудные районы и узлы разной перспективности и их номера: 13 – перспективные: с рудопоявлениями Au-Cu-Fe-оксидного типа: Хим-Кирганикский (1), Шаромский (2); с рудопоявлениями меднопорфирового типа: Левинсон-Лессинга (3), Крутогоровско-Адриановский (4), Лунтосский (5), Пылгинская рудная зона (6), Хиузно-Ушканьинский (18), Ваняваямский (7), Тыкляваямский (8), Шаманкинский (9), Тылгатский (10), Кумрочский (11), 14 – условно перспективные, выделенные по признакам периферических частей меднопорфировых РМС: Малетойваймский (12), Сээрваймский (13), Авачинско-Китхойский (14), Белогорский (15), 15 – с неясной перспективностью: Кондыревский (16), Среднеорловкинский (17)

Рисунок 17 – Вулканоплутонические пояса Корякско-Камчатского региона и положение потенциальных меднопорфировых рудных районов и узлов разной перспективности [Мигачев, Минина, Звездов, 2020]. Составлено на основе Государственных геологических карт и карт полезных ископаемых масштаба 1:1 000 000, 1:500 000 и 1:200 000

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

По результатам исследований ряда меднопорфировых месторождений (МПМ) России, Казахстана и Узбекистана, обобщения и анализа отечественных и зарубежных публикаций по закономерностям размещения, геологическому строению и условиям формирования объектов названного типа, принципам и методам их прогноза, поисков и оценки, а также моделирования рудно-магматических систем (РМС), которым они принадлежат, сделаны следующие выводы.

1. РМС базальтоидных и андезитовидных ВПП различаются не только петрологией рудоносных плутоногенных формаций, рудно-метасоматической зональностью и вещественным составом руд МПМ, но и сочетаниями (наборами) месторождений других рудно-формационных типов, сопряженных и/или совмещенных с ними в объеме таких систем. Характер проявления комплексной металлогении зависит от состава и степени дифференциации магматических очагов. В РМС, сформировавшихся на раннем этапе становления андезитовидных ВПП, кроме меднопорфировых нередко присутствуют древние месторождения фундамента поясов, а в некоторых случаях рудные объекты последующих этапов развития ВПП, что не характерно для базальтоидных поясов. В целом, такие системы могут рассматриваться как закономерные совокупности магматических и рудных формаций, возникающих в ходе эволюции очагов в земной коре океанического, континентального и переходного типов и образующих вертикально-латеральные ряды, изучение строения которых может быть использовано при прогнозе как меднопорфировых, так и ассоциирующих с ними скарновых, мезо- и эпitherмальных месторождений цветных и благородных металлов.

2. МПМ мирового класса формировались в специфических геодинамических и структурно-петрофизических обстановках. Благоприятными для их возникновения были сегменты магматических дуг (ВПП), на ранних стадиях развития которых господствовал режим интенсивного коллизионного сжатия, подавлявший вулканизм и приводивший к возникновению мощных флюидонасыщенных магматических очагов в верхней части земной коры. В период их разгрузки при инверсии тектонических напряжений необходимым условием для рудонакопления в значительных масштабах было наличие над рудоносными интрузивами (выступами-апофизами «материнских» плутонов) малопроницаемых толщ «упруго-пластичного» либо «упруго-вязкого» деформационного типа, которые способствовали сосредоточению флюидной фазы в верхах магматических колонн и концентрации металлов. Карбонатные отложения (доломиты, известняки) и богатые железом базитовые комплексы в составе таких толщ являлись также *геохимическими барьерами*, приводившими к образованию высокосортных руд. Определенную роль играла исходная рудоносность интрузивной рамы – древние рудные месторождения и геохимические аномалии субстрата ВПП, подвергавшиеся регенерации в тепловом поле плутонов с переотложением рудного вещества активизированными метеорными водами на верхних уровнях систем. Уникальные по запасам объекты, сформировавшиеся при становлении крупных магматических очагов в «подэкранных» структурно-петрофизических обстановках, как правило, выделяются повышенными концентрациями металлов в рудах, отражающими совмещение в пространстве продуктов многостадийного магматизма и рудогенеза.

Для поисков крупных МПМ наиболее перспективны магматогенные поднятия длительного «воздымания» с многофазными плутонами рудоносных формаций в «яд-

рах» таких структур. К критериям прогноза таких объектов следует отнести наличие нескольких порфирировых фаз и многочисленных рудообразующих минеральных ассоциаций, ареалы распространения которых на крупных месторождениях часто совмещены в пространстве из-за наложения продуктов многостадийного рудогенеза, связанного с длительно функционировавшими магматическими очагами, а также из-за «экранированного» влияния перекрывающих толщ, игравших роль петрофизических и геохимических барьеров. Влияние таких толщ до сих пор недооценивалось, поскольку на многих объектах они в значительной мере ассимилированы магматическим расплавом, преобразованы наложенными метасоматическими процессами, либо уничтожены эрозией и сохранились лишь в виде ксенолитов на флангах рудных районов и полей.

Для поисков скрытых месторождений в комплексе с традиционными методами ГРП целесообразно применять *глубинную сейсмо-, гравит- и магнитометрическую съемку* с моделированием морфологии интрузивных массивов, *космодешифрирование* для выделения кольцевых и радиальных тектонических структур, фиксирующих тектонические «просадки» над ними, *современные модификации ионно-сорбционного анализа (EnzymeLeachSM и BioLeach)* для выявления надрудных солевых ореолов, по интенсивности и размерам в несколько раз превосходящих вторичные ореолы рассеяния элементов, а также современные *методы микроанализа (LA-ICP-MS, SEM-EDS и WDS)*, позволяющие по элементам-примесям в минералах-индикаторах, таких как эпидот, хлорит, магнетит, выявлять периферийные части пропиловых ореолов МП РМС в областях регионального зеленокаменного метаморфизма, повсеместно развитого в ВПП.

3. Характер деформаций пород при внедрении магматического расплава и их фильтрационные параметры влияли на морфологию порфирировых интрузивов, форму и строение сопряженных с ними рудоносных штоков, уровни концентрации металлов в рудах и, в конечном итоге, на запасы месторождений, что необходимо учитывать при их поисках и оценке. Основными механизмами возникновения рудовмещающих трещин были гидроразрыв и контракция при охлаждении, кристаллизации и дефлюидизации рудоносных магматических тел, сопровождающиеся образованием трещин в их апикальных частях, а также в породах кровли с раскрытием более древних трещин. Масштабы проявления этих процессов зависели от петрофизических характеристик вмещающих сред.

Метасоматические преобразования пород в РМС сопровождались значительными изменениями их физико-механических свойств, масштабы которых зависели от их исходного состава. Вулканогенные и интрузивные породы основного состава обладали меньшими емкостными и более высокими упруго-прочностными свойствами в сравнении со средними и кислыми. Однако, по мере роста степени преобразований пород эти различия нивелировались, что в принципе позволяет выделять рудовмещающие фации метасоматитов по петрофизическим параметрам и рассчитанным по ним комплексным коэффициентам, что может быть использовано при оконтуривании минерализованных зон.

4. Строение и параметры РМС, пространственно-временная эволюция гидротермальных потоков в их объеме, расшифрованные с помощью градиентно-векторных концентрационных моделей рудных тел месторождений Кальмакыр, Дос Побрес, Актогай, Айдарлы, Бошекуль и др. и геохимических ореолов на площадях рудных полей, свидетельствуют о том, что условия формирования МПМ наиболее полно (количественно) могут быть описаны *смешанно-флюидной конвективно-рециклинговой геолого-генетической моделью*. Она предполагает двойственную природу транспортирующих агентов (флюидов, растворов) и рудного вещества –магматогенную (мантийную и коровую) и инфиль-

традиционную (метеорную), в качестве «проводников» тепла и металлоносных флюидов от магматических очагов – порфировые интрузивы (брекчиевые трубки), а также многооборотную циркуляцию гидротермальных растворов на средних и поздних стадиях развития РМС, приводившую к частичному перераспределению металлов в их объемах. Такая модель не противоречит рудно-метасоматической зональности МПМ и строению рудоносных штоковерков типовых объектов, физико-химическим, термодинамическим и изотопным параметрам рудоотложения, расчетам баланса вещества и математическому моделированию тепломассопереноса, а также данным по современным геотермальным системам. При этом главным источником металлоносных флюидов следует признать промежуточные магматические очаги, возникавшие в верхних частях земной коры в определенных геодинамических и структурно-петрофизических обстановках. Вещество регенерируемых рудных залежей частично «реализуется» лишь в виде поздних рудообразующих ассоциаций, развитых обычно на флангах меднопорфировых штоковерков.

Использованные для генетических построений *градиентно-векторные концентрационные модели меднопорфировых рудных полей и месторождений*, позволяющие выявлять структуру «потоков масс и содержаний» и интенсивность их изменений в объемном выражении, могут применяться и в прикладных целях – при выборе ориентировок и плотностей оценочных и разведочных сетей на основе установленных закономерностей строения концентрационных потоков – господствующих трендов и градиентов изменения мощностей рудных тел и содержаний металлов. Определение при моделировании поверхностей инверсии концентраций меди, отделяющих верхние, относительно обедненные, части рудных тел от нижних – более богатых, может быть использовано для оценки эрозионного среза МПМ. Эти задачи могут решаться как на оценочной, так и на разведочной стадиях, с использованием моделей-эталонов и возможностей градиентно-векторного анализа по мере накопления данных опробования скважин.

5. Изучение геотектонической позиции и геолого-структурных условий локализации меднопорфировых месторождений и проявлений ВПП Востока России, их временных и пространственных отношений с объектами других рудно-формационных типов позволило выделить три основные группы (типа) комплексных меднопорфировых рудно-магматических систем (КМП РМС): на сочленении выступов фундамента ВПП с вулканотектоническими депрессиями, в магматогенных поднятиях субстрата поясов и в вулканокупольных структурах. По масштабам они эквивалентны рудным районам (РР) и узлам (РУ), а их внутренние (с фланговыми) и внешние (периферийные) части с собственно меднопорфировыми, скарновыми, мезотермальными и эпитермальными жильными, жильно-прожилковыми и стратоидными месторождениями и проявлениями меди, полиметаллов, золота, серебра и самородной серы могут рассматриваться как рудные поля (РП). Закономерное расположение разнотипных продуктов рудогенеза в объеме таких систем допускает возможность прогноза их недостающих элементов при наличии любого из них, что учтено в разработанных прогнозно-поисковых моделях потенциальных РР и РУ. На их основе проведено прогнозно-металлогеническое районирование восточных регионов России на меднопорфировые и сопряженные руды. В перспективных металлогенических зонах Амурско-Сихотэ-Алиньской и Корьяско-Камчатской минерагенических провинций выделены и оконтурены потенциальные рудные районы и узлы с ранжированием по рекомендуемой очередности постановки ГРР различного масштаба.

Список работ, опубликованных по теме диссертации

Статьи в рецензируемых журналах, входящих в Перечень ВАК

1. Андреев А.В., Авилова О.В., Васюков В.В., **Звездов В.С.**, Минина О.В., Столяренко В.В., Чернов Е.Е. Меднопорфировые проявления Юго-Западной Чукотки и перспективы обнаружения промышленных объектов // Отечественная геология. – 2014. – № 6. – С. 32–47.
2. **Звездов В.С.** Обстановки формирования крупных и сверхкрупных меднопорфировых месторождений // Отечественная геология. – 2019. – № 5. – С. 16–35.
3. **Звездов В.С.** Структурно-петрофизические обстановки формирования меднопорфировых штокверков // Отечественная геология. – 2021. – № 6. – С. 3–44.
4. **Звездов В.С.**, Кривцов А.И., Старостин В.И. Структурно-петрофизические условия формирования меднопорфировых месторождений // Геология рудных месторождений. – 1985. – № 5. – С. 3–21.
5. **Звездов В.С.**, Мигачев И.Ф. Строение и условия формирования не выходящего на дневную поверхность меднопорфирового месторождения Кызата // Геология рудных месторождений. – 1986. – № 1. – С. 73–80.
6. **Звездов В.С.**, Мигачев И.Ф., Гирфанов М.М., Заири Н.М. Обстановки формирования меднопорфировых рудно-магматических систем // Геология рудных месторождений. – 1989. – № 4. – С. 23–37.
7. **Звездов В.С.**, Мигачев И.Ф., Минина О.В. Морфологические типы меднопорфировых штокверков и обстановки их формирования // Руды и металлы. – 2018. – № 4. – С. 37–52.
8. **Звездов В.С.**, Мигачев И.Ф., Минина О.В. Прогнозно-поисковые модели комплексных рудно-магматических систем вулканоплутонических поясов Востока России // Отечественная геология. – 2011. – № 3. – С. 13–21.
9. **Звездов В.С.**, Минина О.В. Рудно-магматические системы вулканоплутонических поясов Востока России // Руды и металлы. – 2010. – № 1. – С. 48–59.
10. **Звездов В.С.**, Сергеева Н.Е., Шишаков В.Б. Геологическое строение и некоторые геохимические особенности меднопорфирового месторождения Кызата // Геология рудных месторождений. – 1987. – Т 29, № 1. – С. 109–111.
11. **Звездов В.С.**, Старостин В.И. Петрофизические критерии поисков и оценки меднопорфирового оруденения // Известия ВУЗов. Сер. Геология и разведка. – 1987. – № 9. – С. 51–59.
12. Иванов А.И., Варганиян С.С., Черных А.И., Кузнецов В.В., Волчков А.Г., **Звездов В.С.** Перспективы развития минерально-сырьевой базы меди, свинца и цинка Российской Федерации // Минеральные ресурсы России. Экономика и управление. – 2016. – № 4. – С. 16–23.
13. Иванов А.И., Варганиян С.С., Черных А.И., Волчков А.Г., Голубев Ю.К., **Звездов В.С.**, Кузнецов В.В., Васюков В.Е., Голубев С.Ю., Конкин В.Д., Котельников Е.Е., Мансуров Р.Х., Прусакова Н.А., Столяренко В.В., Арсентьева И.В. Состояние и перспективы развития минерально-сырьевой базы алмазов, золота, меди, свинца, цинка Российской Федерации (по результатам работ ФГУП ЦНИГРИ за 2012–2015 гг.) // Отечественная геология. – 2016. – № 5. – С. 11–62.
14. Мигачев И.Ф., **Звездов В.С.**, Минина О.В. Научно-методические основы прогноза и поисков медно-порфировых месторождений и перспективы их обнаружения на территории России // Отечественная геология. – 2016. – № 2. – С. 12–22.
15. Мигачев И.Ф., **Звездов В.С.**, Минина О.В. Формационные типы меднопорфировых месторождений и их рудно-магматические системы // Отечественная геология. – 2022. – № 1. – С. 26–48.
16. Мигачев И.Ф., Минина О.В., **Звездов В.С.** Корякско-Камчатский регион – потенциальная медно-порфировая провинция // Отечественная геология. – 2020. – № 4–5. – С. 3–23.
17. Мигачев И.Ф., Минина О.В., **Звездов В.С.** Мезо-кайнозойские вулканоплутонические пояса – новая перспективная провинция Юго-Западной Чукотки // Отечественная геология. – 2014. – № 6. – С. 12–23.
18. Мигачев И.Ф., Минина О.В., **Звездов В.С.** Перспективы территории Российской Федерации на медно-порфировые руды // Руды и металлы. – 2015. – № 1. – С. 74–92.

19. Минина О.В., Мигачев И.Ф., **Звездов В.С.** Прогнозно-металлогеническое районирование южной части Дальневосточного региона на меднопорфировое оруденение // Отечественная геология. – 2019. – № 1. – С. 35–49.
20. **Zvezdov V.S.**, Migachev J.F., Girfanov M.M. Porphyry copper deposits of the CIS and the models of their formation // Ore Geology Reviews. – 1993. – Vol. 7, No. 6. – P. 511–549.
21. **Zvezdov V.S.**, Krivtsov A.I., Starostin V.I. Structural and Petrophysical Conditions of the Formation of Porphyry Copper Deposits // International Geology Review. – 1985. – Vol. 27, No. 12. – 19 p.

Монографии

22. Кривцов А.И., **Звездов В.С.**, Мигачев И.Ф., Минина О.В. Меднопорфировые месторождения. Серия: Модели месторождений цветных и благородных металлов. – М. : ЦНИГРИ, 2001. – 232 с.
23. Методическое руководство по оценке прогнозных ресурсов алмазов, благородных и цветных металлов. Выпуск «Медь» / Кривцов А.И., Мигачев И.Ф., Волчков А.Г., **Звездов В.С.** и др. – М. : ЦНИГРИ, 2002. – 212 с.

Статьи в иных изданиях

24. Волчков А.Б., **Звездов В.С.** Природа проявлений медно-мышьяковой минерализации Малоговьямского стратовулкана // Руды и металлы. – 1997. – № 5. – С. 44–52.
25. Вострокнутов Е.П., **Звездов В.С.**, Ильясов В.М., Мигачев И.Ф., Минина О.В. Автоматизированный прогнозно-поисковый комплекс на базе экспертной системы для прогноза и поисков меднопорфировых месторождений. – Алматы : КАЗИМС, 1987. – 78 с.
26. **Звездов В.С.** Геология и генезис Кирганикского золото-медного месторождения Камчатки // Отечественная геология. – 1997. – № 5. – С. 13–17.
27. **Звездов В.С.** Геотермальные поля — проявления современных гидротермальных систем // Руды и металлы. – 2005. – № 2. – С. 68–77.
28. **Звездов В.С.** Зависимость рудно-метасоматической зональности меднопорфировых месторождений от структурно-петрофизических условий формирования // Труды ЦНИГРИ. – 1989. – Вып. 230. – С. 30–39.
29. **Звездов В.С.** Крупные и сверхкрупные месторождения меднопорфирового семейства в ранговых рядах запасов и содержаний // Отечественная геология. – 2005. – № 2. – С. 46–56.
30. **Звездов В.С.** Обстановки формирования меднопорфировых штокверков различной морфологии // Геология и охрана недр. – 2019. – № 1. – С. 18–31.
31. **Звездов В.С.** Обстановки формирования и критерии прогноза крупных и сверхкрупных меднопорфировых месторождений // Геология и охрана недр. – 2019. – № 4. – С. 4–19.
32. **Звездов В.С.** Строение рудоносного штокверка Коксайского месторождения // Труды ЦНИГРИ. – 1981. – Вып. 163. – С. 48–53.
33. **Звездов В.С.** Строение рудоносных штокверков меднопорфировых месторождений // Геология рудных месторождений. – 1983. – № 3. – С. 17–30.
34. **Звездов В.С.** Структурно-петрофизические закономерности развития меднопорфировых систем // Структуры рудных полей колчеданных, полиметаллических и медных месторождений. – Владивосток : ДВГИ, 1985. – С. 3–21.
35. **Звездов В.С.** Условия формирования рудоносных трещинных зон на меднопорфировых месторождениях // Труды ЦНИГРИ. – 1982. – Вып. 170. – С. 53–61.
36. **Звездов В.С.**, Минина О.В. Принципы прогноза и оценки перспектив комплексных рудных районов в вулканоплутонических поясах // Геология и охрана недр. – 2012. – № 2. – С. 21–36.
37. **Звездов В.С.**, Тихонов В.С. Тепломассоперенос в меднопорфировых рудообразующих системах по данным математического моделирования // Руды и металлы. – 1995. – № 6. – С. 52–57.
38. Кривцов А.И., **Звездов В.С.**, Гирфанов М.М., Егорова И.В. Количественные характеристики рудообразующих меднопорфировых систем // Отечественная геология. – 1995. – № 1. – С. 17–28.

39. Кривцов А.И., Константинов М.М., Кузнецов В.В., Курбанов Н.К., Куторгин В.И., Ручкин Г.В., Волчков А.Г., **Звездов В.С.** Система моделей месторождений благородных и цветных металлов // Отечественная геология. – 1995. – № 3. – С. 11–31.

40. Мигачев И.Ф., Минина О.В., **Звездов В.С.**, Сальников А.Е. Мелкомасштабный прогноз меднопорфирового оруденения на территории трассы БАМ // Экспресс-информация ВИЭМС. – М. : ВИЭМС, 1987. – Вып. 12. – 25 с.

41. Мигачев И.Ф., Минина О.В., **Звездов В.С.**, Сальников А.Е. Положение меднопорфирового оруденения в строении вулканоплутонических поясов зоны БАМ // Оруденение порфирового типа на Дальнем Востоке. – Владивосток : ДВИМС, 1988. – С. 32–45.

42. Минина О.В., **Звездов В.С.**, Мигачев И.Ф., Гирфанов М.М. Крупные меднопорфировые рудно-магматические системы и их геотектоническая позиция // Обзор ВИЭМС. – М. : ВИЭМС, 1991. – 54 с.

Материалы конференций и тезисы докладов

43. **Звездов В.С.** Анализ процесса формирования меднопорфировых месторождений на количественной основе // Тезисы докладов 2-го Всесоюзного совещания «Генетические модели эндогенных рудных формаций». – Новосибирск : ИГиГ СО АН СССР, 1985. – С. 70–72.

44. **Звездов В.С.** Влияние петрофизических характеристик рудовмещающей среды на морфологию и строение меднопорфировых штоковерков // Новые идеи в науках о Земле. Материалы XIV Международной научно-практической конференции. – М. : РГТУ, 2019. – С. 78–80.

45. **Звездов В.С.** Градиентно-векторные модели меднопорфировых систем // Международная конференция «Математическое моделирование в геологии». Тезисы докладов. – Прага, 1997.

46. **Звездов В.С.** Модели меднопорфировых рудно-магматических систем и месторождений // Научно-методические основы прогноза, поисков, оценки месторождений алмазов, благородных и цветных металлов. Сборник тезисов докладов XI Международной научно-практической конференции. – М. : ЦНИГРИ, 2022. – С. 74–76.

47. **Звездов В.С.** Модели рудно-магматических систем для прогноза и поисков меднопорфировых месторождений // Новые идеи в науках о Земле: Доклады IX Международной конференции. – М. : МГА, 2009. – Т. 1. – С. 316.

48. **Звездов В.С.** Обстановки формирования крупных и сверхкрупных медно-порфировых месторождений // Научно-методические основы прогноза, поисков, оценки месторождений алмазов, благородных и цветных металлов. Сборник тезисов докладов IX Международной научно-практической конференции. – М. : ЦНИГРИ, 2019. – С. 171–173.

49. **Звездов В.С.** Рудно-магматические системы порфирового типа: условия формирования и критерии прогноза крупных и сверхкрупных меднопорфировых месторождений // Научно-технологические и информационное обеспечение оценки недр Казахстана. Материалы международной научно-практической конференции «Бекжановские чтения». – Алматы, 2019. – С. 13–18.

50. **Звездов В.С.** Рудно-магматические системы с комплексной металлогенией вулканоплутонических поясов восточных регионов России // Новые горизонты в изучении процессов магмо- и рудообразования. Материалы научной конференции. – М. : ИГЕМ РАН, 2010. – С. 72–73.

51. **Звездов В.С.** Рудно-магматические системы «порфирового» типа вулканоплутонических поясов Востока России // Международная научно-практическая конференция по геологии, поискам и разведке полезных ископаемых, минерагения. Тезисы докладов. – М. : РУДН, 2011. – С. 41–42.

52. **Звездов В.С.** Рудно-магматические системы порфирового типа: металлогения, условия формирования, критерии прогноза крупных меднопорфировых месторождений // Научно-методические основы прогноза, поисков, оценки месторождений алмазов, благородных и цветных металлов. Сборник тезисов докладов VIII Международной научно-практической конференции. – М. : ЦНИГРИ, 2018. – С. 129–131.

53. **Звездов В.С.** Структурно-петрофизические критерии прогноза меднопорфирового оруденения // Материалы Всесоюзного совещания «Научные принципы прогнозирования эндогенного оруденения в Восточно-Азиатских вулканических поясах СССР». – Хабаровск : ДВИМС, 1990. – С. 43–44.

54. **Звездов В.С.** Условия формирования, критерии прогноза и поисков крупных и сверхкрупных меднопорфировых месторождений // Научно-методические основы прогноза, поисков, оценки месторождений алмазов, благородных и цветных металлов. Сборник тезисов докладов IX Международной научно-практической конференции. – М. : ЦНИГРИ, 2021. – С. 72–75.
55. **Звездов В.С.**, Мигачев И.Ф., Минина О.В., Чернов Е.Е. Модели рудно-магматических систем с комплексной металлогенией для прогноза и поисков медно-порфировых месторождений // Прогноз, поиски, оценка рудных и нерудных месторождений – достижения и перспективы: Тезисы докладов научно-практической конференции. – М. : ЦНИГРИ, 2008. – С. 80–81.
56. **Звездов В.С.**, Мигачев И.Ф., Минина О.В. Принципы прогноза месторождений меднопорфировых и сопряженных руд в вулканоплутонических поясах Востока России // Международная конференция «Геология, тектоника и минерагения Центральной Азии». Тезисы докладов. – СПб. : ВСЕГЕИ, 2011. – 4 с. (CD издание).
57. **Звездов В.С.**, Минина О.В. Модели рудно-магматических систем вулканоплутонических поясов для прогноза и поисков месторождений меднопорфировых и сопряженных руд // Руды и металлы. – 2011. – № 3–4. Специальный выпуск памяти А.И. Кривцова. Тезисы докладов научно-практической конференции «Научно-методические основы прогноза, поисков и оценки месторождений твердых полезных ископаемых – состояние и перспективы». С. 63–64.
58. **Звездов В.С.**, Чурилова Т.А. Влияние структурно-петрофизических условий формирования на морфологию и строение меднопорфировых штокерков // Научно-методические основы прогноза, поисков, оценки месторождений алмазов, благородных и цветных металлов. Сборник тезисов докладов IX Международной научно-практической конференции. – М. : ЦНИГРИ, 2019. – С. 168–170.
59. Мигачев И.Ф., **Звездов В.С.** Моделирование обстановок формирования меднопорфировых рудно-магматических систем // Рудообразующие процессы и системы (Доклады советских геологов на XXVIII сессии Международного Геологического Конгресса, Вашингтон). – М., 1989. – С. 168–178.
60. Мигачев И.Ф., **Звездов В.С.** Строение и металлогения андезитовидных и базальтоидных вулканоплутонических поясов с меднопорфировым оруденением // Научно-методические основы прогноза, поисков, оценки месторождений алмазов, благородных и цветных металлов. Сборник тезисов докладов IX Международной научно-практической конференции. – М. : ЦНИГРИ, 2019. – С. 185–187.
61. Мигачев И.Ф., **Звездов В.С.**, Минина О.В. Научно-методические основы прогноза, поисков и оценки медно-порфировых месторождений и перспективы их обнаружения на территории России // Научно-методические основы прогноза, поисков и оценки месторождений твердых полезных ископаемых – состояние и перспективы. Сборник тезисов докладов научно-практической конференции. – М. : ЦНИГРИ, 2015. – С. 19–20.
62. Мигачев И.Ф., Минина О.В., **Звездов В.С.** Перспективы Магаданской области на меднопорфировые месторождения // Научно-методические основы прогноза, поисков и оценки месторождений твердых полезных ископаемых – состояние и перспективы. Сборник тезисов докладов научно-практической конференции. – М. : ЦНИГРИ, 2016. – С. 42–43.
63. Migachev I.F., **Zvezdov V.S.** Morphology and evolution of porphyry copper stockwork systems // 7th Symposium of IAGOD. Proceedings. Stuttgart. 1988. – Vol. 1. – P. 595–602.
64. Migachev I.F., **Zvezdov V.S.** Morphology and evolution of stockwork system in porphyry copper deposits // Proceedings of the 7th IAGOD. Terra cognita, 1986. Lulea. – Vol. 6, № 3. – P. 554–555.
65. Migachev I.F., **Zvezdov V.S.** Simulation of formation of copper porphyry ore-magmatic systems // 28th Intern. Geol. Cong. Abstracts. – Washington, 1989. – Vol. 2. – P. 426–427.
66. **Zvezdov V.S.** Models of Cu-porphyry ore-forming systems // Proceedings of the 34th International Geological Congress. Brisbane. – 2012. – P. 1282 (CD edition).
67. Migachev I.F., Minina O.V., **Zvezdov V.S.** Porphyry ore-magmatic systems in volcano-plutonic belts of Eastern Russia // Proceedings of the 34th International Geological Congress. Brisbane. – 2012. – P. 2284 (CD edition).

Подписано в печать 02.08.2022 г.
Формат бумаги 31x30 1/2
Тираж 99 экз.
Полиграфическая база ФГБУ «ЦНИГРИ»
117545, Москва, Варшавское шоссе, д. 129, корп. 1