

## ОТЗЫВ

официального оппонента на диссертационную работу Шадчина Максима Викторовича «Геология и условия образования руд меднопорфирового месторождения Ак-Суг (Северо-восточная Тува)», представленной на соискание ученой степени кандидата геолого-минералогических наук по специальности 1.6.10 – «Геология, поиски и разведка твердых полезных ископаемых, минерагения»

**Актуальность** диссертационной работы определяется необходимостью повышения эффективности поисков меднопорфировых месторождений в Алтае-Саянской складчатой области (АССО), где расположены два объекта этого геолого-промышленного типа – крупное месторождение Ак-Сугское (Ак-Суг), учтенное Государственным балансом запасов полезных ископаемых Российской Федерации, и рядовое Кызык-Чадр, на котором в настоящее время проводятся геологоразведочные работы (оба в Республике Тыва), а также ряд рудопроявлений того же типа. Здесь также имеются молибден-порфировые месторождения Сорское, Агаскырское и Ипчульское (Республика Хакасия). Первое из них, ведущее в РФ по запасам и добыче молибдена, эксплуатируется уже более 70 лет.

Месторождение Ак-Суг, находящееся в одноименном рудном узле, рассматривается как объект-эталон для всего Алтае-Саянского региона. Изучение его геологического строения, зональности, минералого-геохимических характеристик руд необходимо для совершенствования прогнозно-поисковых моделей потенциальных меднопорфировых рудных полей.

**Целью** исследований, результаты которых легли в основу представленной диссертации, является установление геологических и физико-химических условий образования рудных зон, а также выявление минералого-геохимических особенностей и зональности Ак-Сугского меднопорфирового месторождения.

Для ее достижения были поставлены несколько задач. Для их решения проанализирована опубликованная и фондовая литература по объекту и его аналогам; выполнены **комплексные исследования** пород и руд с использованием традиционных (оптическая микроскопия, силикатный анализ), микротермометрических и современных высокоточных методов микроанализа (LA-ICP-MS, SEM EDS/WDS, ICP-AES, газовая хромато-масс-спектрометрия, рамановская спектроскопия и др.). С применением специализированных программ и пакетов (Micromine, Leapfrog, Surfer, Grapher, Statistica, OriginPro и др.) по данным рядового и группового опробования (предоставлены компаниями ООО «Голевская ГРК» и ООО «Тывамедь») и количественного минералогического анализа проведено объемное минералого-геохимическое моделирование месторождения Ак-Суг.

Полученные результаты позволили сформулировать **3 защищаемых положения**, обоснования которых изложены в 6 главах диссертации, в 7-ой дано описание примененных в ходе исследований методов.

В **первой главе** в кратком виде приведены: история открытия и изучения месторождения Ак-Суг; положение Аксугского рудного узла в региональных структурах АССО; стратиграфия, магматизм, тектоника и металлогения района. Описание сопровождается «Геодинамической схемой Тувы и сопредельных территорий» (рис. 1.3) и «Геологической картой Ак-Сугского рудного узла» (рис. 1.3). К последней есть **замечание** технического порядка.

Эта карта очень маленького размера (1/3 стр. формата А4), практически не читаемая. Она охватывает не рудный узел, а Аксугско-Монгойскую металлогеническую зону и ЮВ часть Дербинско-Арыксанской. Карта не информативна – границы рудного узла не показаны; кроме точки местоположения месторождения Ак-Суг, «рудной назрузки» нет. Но понятие рудного района, рудного узла предполагает наличие нескольких рудных объ-

ектов (месторождений, рудопроявлений). Конкретно в пределах рассматриваемого узла, судя по материалам ГК-200 (лист N-47-XIX), публикациям, а также описанию в самой диссертации, имеются рудопроявления Биче-Кадыр-Осское, Кадыр-Ойское, Верхне-Даштыгойское, Холош, Красногоркинское, Гребешковское, парагенетически связанные с аксугским интрузивным комплексом. Часть из них относится к тому же, что и Ак-Сугское месторождение Au-Mo-Cu-порфировому рудно-формационному типу, другая – к жильному полисульфидному и золото-серебряному, характерным для фланговых и верхних частей меднопорфировых систем. Эпитермальные благороднометалльные проявления могут рассматриваться как поисковые признаки скрытых меднопорфировых объектов.

Во *второй главе* описано геологическое строение Ак-Сугского месторождения. В ее начале кратко охарактеризованы породы, вмещающие и перекрывающие рудоносный pluton, морфология, параметры и фазы последнего; отмечено, что продуктивной на Au-Mo-Cu руды является 3-я фаза, представленная тоналит-порфирами и плагиогранит-порфирами. Приведены геологическая карта и разрезы месторождения, а также его структурная схема с сопровождающим описанием геолого-структурного контроля оруденения. Далее, уже в детальном виде (с фото изученных автором прозрачных и полированных шлифов (всего около 300), петрохимическими диаграммами, графиками и таблицами), представлены разделы, касающиеся: петрологии интрузивных пород; возраста магматизма и рудообразования; минерального состава и типов руд с описанием рудных минералов (в т.ч. впервые обнаруженных на изученном объекте), выделением этапов и стадий рудообразования. Эти материалы (за исключением данных по рудам) послужили основанием для формулировки *первого защищаемого положения*: *«Согласно изотопному U-Pb датированию цирконов вмещающих пород Ак-Сугского месторождения, возраст тел тоналит-порфиров и плагиогранит-порфиров 3 фазы аксугского комплекса, локализующих основную массу Au-Mo-Cu оруденения, составляет  $523 \pm 7$  и  $521 \pm 6$  млн. лет соответственно. Полученные геохронологические данные позволяют скоррелировать возраст рассматриваемых интрузивных тел с одним из этапов островодужного магматизма Восточной Тувы».*

Изложенные во второй главе результаты проведенных лабораторно-аналитических исследований (оптическая микроскопия, силикатный анализ, U-Pb датирование цирконов (LA-ICP-MS) интрузивных пород; ICP-AES определение элементного состава пород и РЗЭ), а также их интерпретация, более чем достаточны для обоснования этого тезиса.

Ко второй главе есть *замечания*, не затрагивающие сути первого тезиса и носящие скорее характер дополнений и предложений.

При описании геолого-структурного контроля оруденения (подраздел 2.1.2), основное внимание уделено разломной тектонике, а именно Аксугскому и Челдезрикскому разломам, «в зоне сочленения которых сформировался Аксугский зональный интрузивный массив, с последней порфировой фазой которого пространственно-парагенетически связано Au-Mo-Cu-оруденение».

Роль этих магмовыводящих разломов бесспорно важна. Они повлияли на форму интрузивов и соответственно на распределение продуктов рудогенеза, что отразилось в минералого-геохимической зональности и распределении концентраций металлов в рудных залежах. Однако необходимо также учитывать роль внутри- и околоинтрузивной тектоники, связанной с внедрением и становлением самого рудоносного интрузива. О важности этого фактора свидетельствует конформность (подобие) рудных тел большинства меднопорфировых месторождений, в т.ч. Ак-Сугского, апикальным частям порфировых штоков, с которыми они сопряжены. (Меднорудное тело месторождения Ак-Суг имеет форму усеченного ассиметричного конуса с толстой северной и тонкой южной стенками, центральная безрудная часть которого занята «кварцевым ядром»).

Механизмы образования ореолов мелкой трещиноватости – «каркасов» меднопорфировых штокверков различны. Это возникновение конических и радиальных трещин при внедрении магматических тел; образование разноориентированных трещин в результате гидроразрыва из-за избыточного флюидного давления при их кристаллизации и дегазации; возникновение трещин скола и отрыва при последующей контракции интрузивов при остывании с компенсационными просадками пород кровли. Масштабы проявления этих механизмов зависят от структурно-петрофизических обстановок формирования меднопорфировых систем. При этом на пространственную ориентировку трещин скола, возникающих в интрузивах, и приоткрывание более древних трещин во вмещающих породах, безусловно влияли региональные тектонические напряжения.

Вид диаграммы  $K_2O-SiO_2$  (рис. 2.17) вызывает вопросы. Породы месторождения на ней «падают» в поля трех магматических серий – умеренно калиевой (K-Na) и высоко калиевой (Na-K) известково-щелочных и шошонитовой, характерных соответственно для островодужной, окраинно-континентальной и коллизионной геотектонических обстановок. Но исходный состав пород (габбро-диорит-тоналит-плагиогранитной формации), вмещающих Au-Cu-порфировые руды, соответствует в основном первой из названных серий и только монцогранит-порфиры, отнесенные к «порфирам второго типа», с которыми связана более поздняя молибденовая минерализация, судя по петрографическому описанию, могут принадлежать второй. На островодужное происхождение гранитоидов аксугского комплекса, продуктивных на Au-Cu оруденение, кроме петрологии, указывают также положение подавляющего большинства точек, характеризующих их состав на TAS диаграмме  $(Na_2O + K_2O) vs. SiO_2$  (рис. 2.15), и соотношения в них содержаний редких элементов (Nb, Ta, Rb, Y), проиллюстрированные дискриминационными диаграммами Пирса (рис. 2.19).

Очевидно, что повышенная калиевая щелочность пород в использованной для построения диаграммы выборке, скорее всего обусловлена наложенными гидротермальными изменениями – биотитизацией и калишпатизацией, что отмечено автором, а также более поздней серицитизацией. Представляется, что при построении упомянутой петрохимической диаграммы целесообразнее было использовать данные по составу лишь наименее измененных разновидностей пород, либо на имеющейся диаграмме выделить точки, им соответствующие.

Присутствие пород монцитонитоидного ряда (порфиры II центральной части Аксугского плутона) с рассеянной молибденовой минерализацией среди дифференциатов тоналитового, с которыми сопряжена золото-медная штокверковая, свидетельствует о том, что изученная рудно-магматическая система, скорее всего, является полиформационной. На это дополнительно указывают: установленная на объекте поздняя низкотемпературная редкоземельная минерализация и отражающая ее Ce-La-Y-P геохимическая ассоциация, выделенная факторным анализом данных рядового и группового опробования (материалы 3-й главы), и, наконец, присутствие Арысканского месторождения и рудопроявлений редких металлов и земель в соседней Дербинско-Арысканской металлогенической зоне, формирование которых, по-видимому, связано с более поздним (постаккреционным) магматизмом. Вопрос дискуссионный и требует дальнейшего изучения.

В *третьей главе* описаны геохимическая, метасоматическая и минералогическая зональность месторождения Ак-Суг, установленные статистической обработкой данных рядового (61752 пробы на 19 элементов) и группового (7451 проба на 40 элементов) опробования, количественного минералогического анализа (500 проб), а также изложенных в предшествующей главе результатов изучения пород и руд в шлифах и аншлифах и элементного состава рудных минералов (пирита, халькопирита, борнита, молибденита, блеклых руд, энаргита, халькозина, сфалерита, самородной меди и др.) с применением электронной микроскопии (SEM EDS/WDS) (~ 100 образцов и более 2000 анализов).

С использованием факторного анализа методом главных компонент выделены 8 геохимических ассоциаций, каждая из них отвечает определенному минеральному парагенезису различных стадий рудообразования и характеризует разные части (уровни) меднопорфировой системы: *породная* – Al-V-Ti-Mg-Ga-Sc-Y-Na; *пиритового ореола* – Fe-Co-S; *полиметаллическая* (флангов и надрудного пространства) – Zn-Cd-Pb; *редкоземельная* – Ce-La-Y-P; *главная рудная* (зона богатых Cu-Au-содержащих борнит-халькопиритовых и теннантит-халькопиритовых руд) – Cu-Bi-Ag-Se-(As-K-Au) *сульфосольная* (эпитермальная энаргит-блеклорудная минерализация верхнего уровня системы) – Sb-As-(Hg); *низкотемпературная* карбонатная с баритом – Ba-Sr-(Ca); *молибденовая* (сопряженная с поздним штоком порфиров группы II) – Mo-Re.

По данным детального минералого-петрографического картирования установлено, что Au-Cu-порфировые руды локализованы в эндо-экзоконтактной зоне штока тоналит-порфиров I типа 3-й фазы аксугского комплекса, а более поздняя рассеянная молибденовая минерализация в его центральной части («кварцевом ядре») сопряжена с плагиогранит-порфирами – монцонит-порфирами (порфирами II типа). Пирит-халькопиритовые и халькопирит-пиритовые руды распространены в кварц-хлорит-серицитовых и пропилитовых метасоматитах, борнит-халькопиритовые и халькопирит-теннантитовые – в реликтовых зонах более ранних высокотемпературных биотит-калишпатовых. В зоне гипергенеза развита низкотемпературная медная минерализация (самородная медь, халькозин, куприт и др.). К поздним продуктам гидротермальной деятельности отнесены безрудные карбонатные и кварц-карбонатные прожилки.

С использованием ИТ технологий построена серия погоризонтных планов и разрезов месторождения по опорным буровым профилям, характеризующих метасоматическую и минералого-геохимическую зональность, а также распределение концентраций Cu, Au, Ag, Mo, Zn. Все они отражают концентрически-зональное строение умеренно эродированной меднопорфировой системы и демонстрируют связь последовательности рудообразования со становлением аксугского рудоносного плутона.

Полученные материалы явились основой для **второго защищаемого положения**: *«В составе первичных ореолов Ак-Сугского Au-Mo-Cu-порфирового месторождения, установлено 8 обособленных геохимических ассоциаций, отражающих состав, геохимическую специализацию вмещающих пород и основные минеральные парагенезисы кольцеобразных минерализованных зон порфировой системы. Метасоматическая зональность проявлена в последовательной смене от периферии к центру зон пропилитизации, кварц-хлорит-серицитовых, кварц-серицит-хлоритовых метасоматитов (с реликтами зон калишипатизации и биотитизации) и окварцевания».*

Приведенные в работе данные комплексных исследований пород и руд при значительном объеме проанализированных проб, а также их интерпретация на должном уровне, вполне достаточны для доказательства этого тезиса.

Материалы **четвертой главы** диссертационной работы не нашли своего отражения в защищаемых положениях, но имеют прикладное значение, поскольку к настоящему времени рудное тело Ак-Сугского месторождения полностью не оконтурено ниже горизонта +700 м (контура проектного карьера), а вертикальный размах оруденения по данным бурения Голевской ГРК в 2014-2019 гг. составляет не менее 900 м (по скважине 2-0 с абс. отм. 1 450–550 м).

Для оценки перспектив глубоких горизонтов Ак-Сугского месторождения построены объемная модель и серия разрезов по разведочным линиям с распределением концентраций Cu и Mo. По модели и разрезам отчетливо видно различие в содержаниях металлов в рудах северного (более богатого) и южного флангов (залежей) месторождения. Значительная мощность рудного тела (от десятков до нескольких сотен метров) с достаточно

высокими концентрациями меди (местами выше 1 %) ниже 700-го горизонта указывают на его возможное продолжение по падению и соответственно на перспективы прироста запасов за счет глубоких горизонтах, особенно для Северной залежи.

Анализ распределения содержания Cu и Mo в построенной блочной модели продуктивности Северной рудной залежи по простиранию и падению подтвердил это предположение, а также оцененный по метасоматической и минералого-геохимической зональности умеренный эрозионный срез месторождения Ак-Суг.

В **пятой главе** изложены материалы изучения флюидных включений в кварцевых и карбонатных прожилках. Для определения их состава применены газовая хромато-масс-спектрометрия – ГХ-МС (4 образца) и рамановская спектроскопия (20 кварцевых пластинок), для установления температур гомогенизации флюидных включений, эвтектики, плавления льда и сжиженных газов (по тем же пластинкам) – термодриометрия.

В итоге в кварце выделены включения: первичные, первично-вторичные и вторичные; однофазные газовые или жидкие, двухфазные газово-жидкие и многофазные (с захваченным кристаллом рудного минерала, предположительно гематита). По установленным микротермометрическим данным рассчитаны соленость и плотность растворов, давление в минералообразующей среде.

Определены интервалы температур гомогенизации флюидных включений. В комплексе с изучением минерального состава руд это позволило выделить основные стадии рудообразования: *высокотемпературную* (500 – 300 °C) – образовались Au-Mo-Cu порфировые руды; *среднетемпературную* (300 – 200 °C) – минералы Au-Ag-Bi-Se-Te ассоциации, полиметаллов, сурьмы и мышьяка; *низкотемпературную* (200 – 70 °C) – карбонатная и редкоземельная минерализация.

Изучение состава фаз во включениях в кварце методом рамановской спектроскопии показало, что в однофазных и многофазных включениях жидкая фаза представлена водой (H<sub>2</sub>O) с растворенными в ней хлоридами натрия и калия, а газовая фаза – углекислотой (CO<sub>2</sub>). Соотношение количества включений с водным и углекислотным составом изменяется в пропорциях от 3:1 до 1:1 от ранних (безрудных) к более поздним рудообразующим минеральным ассоциациям, что свидетельствует о постепенном изменении состава рудоносных растворов с преимущественно водного на углекислотно-водный.

Соотношение воды и углекислоты во флюидных включениях в кварце и кальците Ак-Сугского месторождения, как показал ГХ-МС метод, также меняется от 45:30 в сульфидно-кварцевых прожилках (до 30 отн. % занимают различные органические и неорганические соединения) до 70:30 в карбонатных. По полученным данным сделан вывод о том, что растворы, образовавшие рудоносный штокерк, имели окисленный состав, а растворы, отложившие безрудные кварц-карбонатные жильные зоны, восстановленный.

Полученные результаты свидетельствуют о сложном многостадийном процессе минералообразования в ходе эволюции меднопорфировой системы. Они согласуются с данными В.И.Сотникова, А.Н.Берзиной, Р.В.Кужугета и др. исследователей.

**Шестая глава** посвящена результатам изотопно-геохимических исследований.

Значительная часть данных об изотопном составе серы (30 из 48 анализов) сульфидов – пирита и халькопирита из обеих рудных залежей Ак-Сугского месторождения получена непосредственно автором. Для увеличения выборки привлечены данные предшественников (Кужугет и др., 2019; Сотников и др., 2004). Установлено, что значения  $\delta^{34}\text{S}$  серы халькопирита, пирита и молибденита различных минеральных ассоциаций представлены достаточно выдержанным диапазоном значений от -2,9 до +3,2 ‰ со средним -0,1‰, что свидетельствует о гомогенном источнике серы, предположительно мантийном.

Изученные автором изотопные составы углерода и кислорода жильного кальцита разновозрастных генераций месторождения Ак-Суг (19 измерений), характеризующиеся диапазонами значений:  $\delta^{13}\text{C}$  от -3,6 до 2,2 ‰ со средним значением  $\delta^{13}\text{C}$  -1,1 ‰,  $\delta^{18}\text{O}$  от 10,4 до 21,8 ‰ со средним 14,1 ‰, свидетельствуют о неоднородности их источников и длительной эволюции системы с изменением изотопных соотношений. Сделан вывод о том, что источником воды для образования карбонатных прожилков послужили метаморфические воды, а уголекислоты – морские кембрийские отложения, подвергнувшиеся декарбонизации.

Образование прожилков с наложенной низкотемпературной редкоземельной минерализацией отнесено к самой поздней стадии гидротермального процесса (по мнению рецензента, оно могло быть связано с более поздним (постаккреционным) магматизмом).

Материалы *пятой* и *шестой* глав послужили обоснованием *третьего тезиса*: *«Кварцевые жилы рудных зон Ак-Сугского месторождения сформированы гидротермальными растворами уголекислотно-водного состава в диапазоне температур 79 – 500 °C, давлений – 0,4 – 122,1 бар и солености от 0,35 до 17,52 мас. % (NaCl-экв.). В составе минералообразующих флюидов преобладают  $\text{H}_2\text{O}$  и  $\text{CO}_2$ . Изотопный состав серы ( $\delta^{34}\text{S} = -2,9 - +3,2\text{‰}$ ) главных сульфидных минералов месторождения свидетельствует о гомогенном мантийном источнике рудного вещества. Соотношения стабильных изотопов углерода и кислорода ( $\delta^{13}\text{C}$  -3,6 – +2,2‰;  $\delta^{18}\text{O}$  +10,4 – +21,8‰) карбонатных прожилков указывают на полигенный источник уголекислоты и воды, вовлеченных в рудно-метасоматический процесс».*

Представленные в работе материалы и их качественная интерпретация достаточны для доказательства этого тезиса. Однако, с точки зрения рецензента, в его формулировке лучше было бы указать не общие диапазоны температур, давлений и концентраций гидротермальных растворов, сформировавших рудный штокер Ак-Сугского месторождения, а их значения по стадиям рудоотложения. Такие данные в работе есть, а тезис, хотя и немного «возросший по объему», был бы информативнее.

Также возникает вопрос – почему для выяснения изотопного состава кислорода взяты кальцитовые, а не кварцевые прожилки. На меднопорфировых месторождениях, в т.ч. Ак-Суге, карбонатные прожилки и жилы – продукты поздней и пострудной стадий гидротермального процесса. По результатам же определения изотопного состава кислорода в кварце и температурам его образования можно было бы рассчитать соотношение участия магматических флюидов и вод немагматического происхождения (метеорных, морских и др.) в водной составляющей рудоносных растворов как по стадиям минералообразования, так и для разных (внутренних, фланговых и верхних периферийных) участков меднопорфировой рудно-магматической системы.

В заключение следует отметить, что диссертация М. В. Шадчина является результатом *собственных* детальных и в то же время объемных минералого-геохимических исследований с использованием как традиционных, так и современных высокоточных методов и методик. Комплексный подход к решению поставленных задач обеспечил *достоверность* полученных результатов, а их интерпретация на высоком научном уровне *доказательство* всех защищаемых положений.

*Научная новизна* работы состоит в: уточнении возраста Аксугского плутона и сопряженного с ним меднопорфирового оруденения (U-Pb датированием циркона); построении объемных моделей минералогической, метасоматической и геохимической зональности месторождения Ак-Суг с оценкой уровня его эрозионного среза; уточнении стадийности рудоотложения с выявлением ранее не известных на объекте 16 рудных минералов (шеелит, карролит, штроемейерит, маккинстриит, михарит, самородных Bi и Ag и др.); определении со-

става газовой фазы во флюидных включениях кварцевых и карбонатных прожилков (методом газовой хромато-масс-спектрометрии); получении новых данных по изотопному составу: серы сульфидов – халькопирита и пирита, углерода и кислорода – кальцита.

*Практическая значимость* работы определяется возможностью использования геолого-геохимической информации, полученной при изучении Ак-Сугского месторождения – эталонного медно-порфирового объекта для Восточно-Саянской металлогенической провинции, для уточнения поисковых критериев и признаков рудных объектов аналогичного типа, что будет способствовать повышению эффективности ГРП в Алтае-Саянском регионе.

Актуальные данные о вещественном составе руд, минералого-геохимической зональности, уровне эрозионного среза порфировой системы могут быть учтены при освоении Ак-Сугского месторождения – разработке технологии переработки руд и календарного планирования горных работ и управления рудопотоками.

Сделанные замечания, не затрагивающие сути защищаемых тезисов и являющиеся скорее пожеланиями к дальнейшей деятельности, нисколько не умаляют научного и прикладного значения диссертационной работы. Выдвинутые к защите тезисы в достаточной мере обоснованы представленными материалами. Автореферат отражает содержание диссертации. Основные ее положения отражены в 12 публикациях (личных и в соавторстве), в т.ч. 3-х – в российских журналах, рекомендованных ВАК, и 1-й монографии; в виде докладов они апробированы на 9 научных конференциях и школах.

Диссертационная работа М. В. Шадчина «Геология и условия образования руд меднопорфирового месторождения Ак-Суг (Северо-восточная Тува)» подготовлена на современном научно-методическом уровне и полностью отвечает всем требованиям к кандидатским диссертациям («Положения о присуждении учёных степеней», утверждённого Постановлением Правительства РФ № 842 от 24.09.2013 г.), а ее автор заслуживает присуждения ученой степени кандидата геолого-минералогических наук по специальности 1.6.10 «Геология, поиски и разведка твердых полезных ископаемых, минерагения».

Начальник отдела металлогении

ФГБУ «ЦНИГРИ»,

доктор геол.-мин. наук

Тел. 8 (499) 315-43-65, доб. 159

E-mail: zvezdov@tsnigri.ru



Вадим Станиславович Звездов

Федеральное государственное бюджетное учреждение «Центральный научно-исследовательский геологоразведочный институт цветных и благородных металлов» (ФГБУ ЦНИГРИ)

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

12 февраля 2025 г.

Подпись В.С. Звездова заверяю:

Начальник отдела кадров ФГБУ «ЦНИГРИ»



Л.А. Анцифрова