

ОТЗЫВ ОФИЦИАЛЬНОГО ОППОНЕНТА

на диссертационную работу Гусева Виктора Александровича

«ПРОЦЕССЫ КРИСТАЛЛИЗАЦИОННОЙ ДИФФЕРЕНЦИАЦИИ БОГАТЫХ МЕДЬЮ СПЛОШНЫХ СУЛЬФИДНЫХ РУД ТАЛНАХСКОГО И ОКТЯБРЬСКОГО МЕСТОРОЖДЕНИЙ (НА ОСНОВЕ ИЗУЧЕНИЯ РАЗРЕЗОВ РУДНЫХ ТЕЛ И ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ)»,

представленную на соискание ученой степени кандидата геолого-минералогических наук по специальности 1.6.10. – Геология, поиски и разведка твердых полезных ископаемых, минерагения, 1.6.4. – Минералогия, кристаллография. Геохимия, геохимические методы поисков полезных ископаемых

Диссертационная работа является комплексным исследованием богатых медью сульфидных медно-никелевых руд норильских месторождений и экспериментально полученного образца, имитирующего эти руды. Работа является образцом четко сформулированных задач и рациональных подходов к их решению с учетом современных взглядов в рамках теории магматического сульфидного рудообразования,

Целью исследований являлось выявление происхождения сплошных богатых медью и ЭПГ руд норильских месторождений на основании эмпирических закономерностей концентрирования благородных металлов и в сопоставлении с экспериментальными продуктами кристаллизации схожего по составу расплава.

Актуальность работы обусловлена высокой экономической ценностью объекта исследований и уникальностью изучаемых тел богатых руд, что позволяет установить природные закономерности для наиболее высоко фракционированных продуктов кристаллизации сульфидной жидкости. Основные запасы богатых руд Талнаха и Хараелаха уже отработаны и высококачественные детальные данные по строению двух линз представляют собой ценный невосполнимый материал.

Научная новизна подтверждается полученными результатами. Выполнено сравнение двух типов руд, образовавшихся из высокофракционированных обогащенных медью сульфидных расплавов, при этом установлен путаронитовый состав руд линзы Октябрьского месторождения. Предложен механизм ликвации станидной и плюмбидной жидкостей в сульфидных расплавах. Минералогический состав изученных руд сопоставлен с результатами эксперимента по кристаллизационной дифференциации имитационного сульфидного расплава. Изучен состав и ассоциации пентландита аномально обогащенного палладием до 11,26 мас. % и предложен механизм его образования.

Личный вклад автора очевиден на всех ступенях исследований. В работе использованы данные 7000 ЭДС и 2000 волновых анализов природных образцов, 1500 ЭДС анализов экспериментальных продуктов, а также 34 ИСПМС анализа валовых

проб на ЭПГ в международной лаборатории. Такое огромное количество материала обосновывает **достоверность** выводов.

Диссертация состоит из шести глав, введения и заключения, в ней сформулированы три защищаемых положения.

Первое защищаемое положение постулирует наличие выраженной минералого-геохимической зональности халькопиритовых руд Талнахского месторождения и отсутствии таковой в моихукитовых рудах Октябрьского месторождения, что объясняется разными исходными составами расплава и физико-химическими условиями их кристаллизации. Первая часть защищаемого положения доказывается детальным фактическим материалом четвертой главы, где описаны минеральная и химическая зональность и проинтерпретированы условия кристаллизации и субсолидусные преобразования минеральных фаз. **Замечанием** к этому защищаемому положению является наименование этих руд моихукитовыми, тогда как моихукит в рудах не был обнаружен. Это противоречит принятым правилам названия минеральных типов руд, приводит к несоответствиям между данными и выводами, а также в дальнейшем затруднит правильность ссылок на работу в литературе. Автор называет эти руды моихукитовыми «во избежание путаницы» (стр. 55), что, однако, приводит к существенно большему несоответствию. Название минерального типа руды должно включать названия основных составляющих ее рудных минералов и это должно быть учтено в будущей публикации этих данных.

Второе защищаемое положение основано на экспериментальных данных по порядку кристаллизации модельного расплава. В нем обосновываются три различных механизма кристаллизации, включающие: а) напрямую из сульфидного расплава; б) при твердофазном распаде; в) при отделении несмесимого расплава подсистемы $\text{Cu}(\text{Fe}, \text{Ni}) - \text{S}(\text{Pb}, \text{Bi}, \text{Sb}) - \text{ЭПГ}(\text{Ag}, \text{Au})$ от материнского сульфидного, то есть металлоидно-сульфидной несмесимости. Это положение надежно подкреплено экспериментальными данными. Важными и новыми представляются данные по признакам высокотемпературного расслоения материнского расплава с выделением металлоидно-сульфидной жидкости, концентрирующей в том числе ЭПГ. Существование висмутид-плюмбид-стибнидного концентрирования согласуется с авторскими находками глобул подобного состава, как застывших капель несмесимой жидкости в природных образцах, как описано в главе 4. Эти природные наблюдения несомненно требуют дополнительного опубликования с акцентом на подобие природных и экспериментальных данных по высокотемпературной металлоидно-сульфидной несмесимости, учитывая, что экспериментальные расплавы слишком обогащены

металлоидами сверх природно-достижимых концентраций, тогда как наблюдаемые глобулы выделяются из реально существовавших расплавов.

В данных по экспериментальному слитку автором измерен состав пентландита, в котором содержание никеля меняется от 35 до 52 мас.% (таблицы в главе 5). В главе 4 автор объясняет вариации содержаний никеля в пентландите изменением фугитивности серы в зональном сульфидом теле. Если действительно содержания никеля в пентландите контролируются фугитивностью серы, то контрастные составы пентландита в слитке должны отражать огромный масштаб вариаций фугитивности серы. Какой процесс приводит к таким огромным вариациям в экспериментальном продукте? Этот вопрос **не является замечанием** к данной работе, так как выходит за рамки защищаемых положений, но было бы интересно узнать мнение диссертанта и его соавторов на то, какие процессы контролируют изменчивость состава пентландита в эксперименте и можно ли его состав использовать для оценок фугитивности серы в сульфидном расплаве при магматических условиях.

В этой части кажется **неуместным** использование придуманной кальки с английского «флеймоподобные» (Рис. 5.1.2), когда для подобных твердофазных выделений пентландита есть классический русский термин «пламеневидные».

Третье защищаемое положение и шестая глава «ЭПГ в структуре сульфидов» посвящены изучению концентраций Pd в пентландите. Результаты, представленные в этой главе, опубликованы в статье в Minerals. Объектом исследования является редчайшая, как для Норильска, так и для всего мира, находка пентландита аномально и зонально обогащенного Pd. Учитывая такую важность находки, к представлению данных по его составу можно было бы подойти более аккуратно, так как эти данные будут широко использоваться и цитироваться. Следовало бы использовать термин «рентгеноспектральный микроанализ» и конкретизировать метод анализа (волновой или ЭДС) в таблице 6.1.1 и далее в приложении 3. Как правило, для метода ЭДС и РСМА количество цифр после запятой в содержаниях не должно превышать 2 (четыре значимые цифры), или же требуется привести условия анализа, которые позволяют достичь более высокой точности. Нулевые содержания в природе не существуют, существует предел обнаружения метода, поэтому вместо 0, в таблицу надо вносить прочерк или <ПО, а также следует добавить пределы обнаружения метода в текст или таблицу. Концентрации Pt и Pd, меньше 0.04 мас. %, измеренные использованными методами, маловероятно являются надежными и требуют дополнительного обоснования условий анализа и сравнения со воспроизводимостью стандартов со схожим уровнем содержаний.

Кроме таких технических замечаний, **следует отметить**, что РСМА или ЭДС данные не могут быть использованы для определения форм нахождения элементов, все же эти методы нужны для измерения концентраций и распределения элементов в минералах. Эти методы, также как ЛА ИСПМС, могут предоставлять косвенные признаки, свидетельствующие о той или иной возможной форме нахождения ЭПГ в сульфидах. Установленные антикорреляции Pd с Ni являются **косвенным** доказательством, а выводы по изоморфизму, которые приводятся в тексте, кажутся поспешными, так как, изучение структуры не проводилось. Помимо этого, крайне интересными кажутся и установленные антикорреляции Pd с S с коэффициентом корреляции -0.74, хотя возможные причины этого в работе не обсуждаются.

Очень интересным является обсуждение механизма образования пентландита именно при реакциях с участием ISS. Во второй части третьего защищаемого положения автор предполагает локальное воздействие флюида, содержащего Pd и Fe. Почему флюидом переносился только Pd, и какова судьба Pt в таком процессе? Также возникает вопрос о причинах столь низкого валового Pt/Pd отношения, не соответствующего трендам фракционной кристаллизации. Разница между коэффициентами распределения реакции ISS/L у Pd к Pt не больше 2, а судя по данным с рис. 4.1.16 отношение Pd/Pt в этих рудах составляет около 100, тогда как по данным других авторов Pd/Pt в богатых медью рудах не превышает 20 (см. Zientek et al., 1994; Duran et al., 2017; Дистлер и др., 1996).

В качестве дискуссии на тему магматического и гидротермального концентрирования палладия в пентландите можно дополнить, что несмотря на то, что коэффициент распределения Pd между MSS и сульфидным расплавом меньше 1, растворимость Pd в MSS при повышении температуры увеличивается и, например, при 900°C, концентрация Pd в MSS может достигать 11 мас. %. Это было показано в нескольких работах, например в Makovicky et al., 1986, которая цитируется в диссертации. Также коэффициенты распределения ЭПГ в MSS увеличиваются с повышением концентраций Ni в нем (см. данные Barnes et al., 2001).

Обзор современных представлений по закономерностям кристаллизационной дифференциации сульфидной представлен кратко, но на высоком уровне с учетом всех системообразующих работ. Отдельная глава посвящена обзору экспериментальных исследований системы Cu-Fe-S, проведенному также на высоком уровне.

Работа прекрасно иллюстрирована, многочисленные минеральные фазы тщательно и корректно идентифицированы и показаны на рисунках. Хотя, местами, подписи под некоторыми рисунками не приводят первичный источник информации, в

целом, мелкие имеющиеся недочеты не снижают положительного впечатления от работы.

Защищаемые положения отражены в двух опубликованных статьях списка ВАК и представлены на трех конференциях 2021г., что не много, учитывая полученные результаты, но удовлетворяет требованиям ВАК. Хочется пожелать диссертанту опубликовать все те данные, которые остались вне поля зрения в опубликованных работах.

Представленные замечания не являются критическими и не влияют на общую положительную оценку достижений диссертанта как представителя новосибирской школы, знаменитой комплексным подходом к исследованиям магматических систем. Диссертация В.А. Гусева отвечает требованиям, предъявляемым ВАК к кандидатским диссертациям, а ее автор Гусев Виктор Александрович заслуживает присуждения ученой степени кандидата геолого-минералогических наук по специальностям: 1.6.10 - Геология, поиски и разведка твердых полезных ископаемых, минерагения, 1.6.4. - Минералогия, кристаллография. Геохимия, геохимические методы поисков полезных ископаемых.

Служеникин Сергей Фёдорович

кандидат геолого-минералогических наук, старший научный сотрудник

Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт геологии рудных месторождений, петрографии, минералогии и геохимии Российской академии наук (ИГЕМ РАН) 119017, Москва, Стар монетный пер., д. 35, E-mail: sluzh@igem.ru, Тел.: 8-916-213-36-06

Я, Служеникин С.Ф., даю согласие на включение своих персональных данных в документы, связанные с работой диссертационного совета, и их дальнейшую обработку.

Служеникин

/Служеникин С.Ф./

подпись Служеникина С.Ф. заверяю
Зав. канцелярией ИГЕМ РАН Оболенская М.Н.

05.02.2024

