

Отзыв официального оппонента
на диссертационную работу Сильянова Сергея Анатольевича

**«ГЕОЛОГИЯ И МИНЕРАЛОГО-ГЕОХИМИЧЕСКИЕ ИНДИКАТОРЫ ГЕНЕЗИСА
ЗОЛОТОРУДНОГО МЕСТОРОЖДЕНИЯ ОЛИМПИАДА (ЕНИСЕЙСКИЙ КРЯЖ)»**

представленную на соискание ученой степени кандидата геолого-минералогических наук по специальности 25.00.11 – геология, поиски и разведка твердых полезных ископаемых, минерагения

Диссертационная работа Сильянова Сергея Анатольевича посвящена исследованию особенностей вещественного состава и выявлению условий формирования одного из крупнейших золоторудных месторождений России и мира – Олимпиадинского. Использование современных прецизионных *in-situ* методов анализа минерального вещества уникального золоторудного гиганта позволили соискателю получить большой объем новых фактических данных о геохимии руд и отдельных минеральных комплексов, что, в свою очередь, способствует развитию представлений о генезисе золоторудных месторождений в осадочных толщах и определяет **актуальность и практическую значимость** диссертационной работы.

Научная новизна работы заключается в изучении особенностей рудных минералов на качественно новом уровне. Сильяновым С.А. впервые выполнены масштабные исследования сульфидов и самородного золота Олимпиадинского месторождения с использованием методов ICP-MS, в том числе и с применением лазерной абляции. Кроме того, в работе приводятся новые сведения о составе рудоносного флюида, а также делается обобщение собственных и литературных изотопно-геохимических данных о рудном процессе.

В основе диссертационного исследования Сергея Анатольевича лежит широкий спектр методов и подходов к изучению месторождения. Это оптическая и электронная микроскопия, изучение химического состава рудных минералов методами EPMA и LA-ICP-MS, мессбауэровская спектроскопия, определение параметров рудообразования на основе изучения флюидных включений, изотопно-геохимические методы, а также определение абсолютного возраста Ag-Ag методом. Это, несомненно, является сильной стороной рецензируемой работы.

Диссертация Сильянова С.А. состоит из введения, шести глав, заключения и одного приложения, общим объемом 185 стр., включает 64 рисунка, 18 таблиц и список литературы, содержащий 273 наименования.

Во введении диссертант обосновывает актуальность исследований, показывает научную новизну и практическую значимость работы, формулирует цели и задачи исследований.

В первой главе «Геология Олимпиадинского месторождения» приводится исторический очерк об открытии и периодах изучения объекта исследования, а также геологическая характеристика месторождения, рудного поля и региона в целом. В заключении главы весьма кратко (на 1,5 страницах) приведен раздел «Геохимия рудного тела», который, по мнению оппонента, скорее относится к краткой характеристике геохимических полей месторождения и не освещает геохимические характеристики руд и различных минеральных парагенезисов. Замечаниями к первой главе могут служить, как было сказано выше, отсутствие сведений о геохимии руд и различных типов вмещающих пород, а также весьма скудная петрографическая характеристика рудовмещающих метасоматитов. При том, что судя по введению, соискателем было изучено ~1000 шлифов и аншлифов. Кроме того, поскольку глава носит скорее реферативный характер, название диссертации более правильно озаглавить «Минералого-геохимические индикаторы генезиса золоторудного месторождения Олимпиада (Енисейский край)»

Вторая глава «Рудная минералогия месторождения» посвящена описанию минерального состава первичных и окисленных руд, а также обоснованию последовательности формирования минеральных парагенезисов. К данной главе имеется ряд замечаний:

- непривычно выглядит структура самой главы, в которой обсуждение стадийности минералообразования предшествует характеристикам текстур и структур руд, а также весьма скудному описанию собственно рудных минералов. В главе нет данных о морфологии выделений и размерности индивидов и агрегатов рудных минералов. С учетом проводимых LA-ICP-MS исследованиях (с размером пучка от 25 до 110 мкм) эти сведения позволили бы оценить достоверность полученных результатов. А судя по микрофотографиям (рис. 2.7, стр. 47), далеко не все рудные минералы характеризуются размерами, позволяющими провести такого рода исследования;

- обсуждение последовательности смены формирования минералов (например, бертьерит – стибнит – самородная сурьма, стр. 39) делается на основе приведенной схемы последовательности минералообразования без должного ее минералогического обоснования;

- гудмундит - единственный сульфидный минерал, формирование которого рассмотрено относительно детально. При этом, судя по формуле, приведенной на стр. 40, описывающей формирование «наиболее раннего» гудмундита как продукта распада тетраэдрита, предполагается формирование также и халькопирита. Однако такие взаимоотношения на фотографиях не приводятся. Кроме того, согласно схеме последовательности минералообразования, халькопирит в стадии «поздних сульфидов» формируется ближе к концу отложения гудмундита;

- по ходу описания типов руд и самородного золота в первичных рудах приводятся данные о составе Au^0 , однако не ясно, каким методом анализа получены результаты.

На фоне высказанных замечаний, заключительная часть второй главы (2.1.2 Окисленные руды) выглядит существенно более «удачной». Материал раздела структурирован и последователен, выводы и предположения сопровождаются необходимым количеством наглядных и убедительных иллюстраций.

В третьей главе приводятся данные о геохимии рудных минералов, полученные с помощью ICP-MS и LA-ICP-MS методов. Глава содержит большое количество новой и актуальной информации касательно микросостава рудных минералов и распределении в них элементов-примесей. Особенно ценными выглядят *in-situ* исследования отдельных рудных минералов. Структура главы содержит два раздела и заключительные замечания. Первый раздел посвящен анализу распределения редких и рассеянных элементов в рудных минералах (ICP-MS), второй – изучению состава рудных минералов в части их микропримесного состава (халькофильные, сидерофильные элементы и благородные металлы; LA-ICP-MS). Результаты анализов в табличной форме приведены только к первому разделу главы, что существенно затрудняет оценку достоверности сделанных Сильяновым С.А. выводов. Часть материалов, изложенных в главе, положено в основу обоснования первого защищаемого положения. К главе, в особенности к первому разделу, имеется ряд существенных замечаний:

- самым важным упущением первого раздела главы является полное отсутствие обоснования вероятных схем изоморфного замещения REE в структурах изученных рудных минералов. Тогда как в такого рода исследованиях классически уделяется этому вопросу особое внимание. Из-за отсутствия данного обзора и вытекает второе, наиболее существенное замечание к разделу;

- с одной стороны, Сергей Анатольевич со ссылкой на собственные публикации справедливо заключает, что: (1) «...Отмечена тенденция концентрирования арсенопиритом минералов, содержащих редкие и рассеянные элементы (циркон, монацит, торит, апатит)...» (стр. 68); (2) «...Ранее отмечена корреляция между количеством микровключений и концентрациями REE в минерале...» (стр. 68). Кроме того, согласно приведенной таблице 3.1., большинство минералов содержат большое количество минеральных включений, в том числе и минералов-концентраторов REE (apatit, Ce-монацит, циркон, флюорит и т.д.). С другой стороны, при интерпретации полученных методом ICP-MS (из навески) данных, возможное влияние упомянутых микровключений никак не учитывается, напротив, с использованием данных о распределении REE делаются выводы об источниках и условиях формирования рудной минерализации. По мнению рецензента, такой методический подход является ошибочным и неприемлемым. Так, например, согласно данным таблицы 3.2., содержание Hf показывает четкую прямую корреляцию с Zr, что является очевидным фактом присутствия циркона в анализируемой навеске. Аналогично, содержание Ce обусловлено присутствием Ce-монацита и циркона, а, следовательно, оценка степени окисленности по Ce-аномалии в данном контексте не правомерно. Таким образом, внешнее подобие спектров распределения редких и рассеянных элементов в рудных минералах и сланцах кординской свиты является следствием присутствия в анализируемой навеске аксессуарных минералов-концентраторов указанных элементов, а не свидетельством «...наследования состава вмещающих пород...» и т.д.

- не совсем ясно, почему при проведении LA-ICP-MS анализа не были определены содержания редких и рассеянных элементов. Ведь именно при такой методике исследования возникает возможность сведения к минимуму возможного влияния минеральных микровключений;

- в работе отсутствуют данные в табличной форме с результатами EPMA и LA-ICP-MS анализов рудных минералов;

- оценку влияния минеральных микровключений лучше проводить с использованием бинарных диаграмм в координатах «катион vs. анион» для всей выборки анализов конкретного минерала, а не по близкому расположению пиков временных LA-ICP-MS спектров;

- рецензент не разделяет точку зрения соискателя на механизм концентрирования золота жидким висмутовым коллектором. На всех описанных рудных объектах, где доказана реализация указанной схемы («поглощение» золота из гидротермального флюида каплями расплава самородного висмута), содержание висмута в рудах на несколько

порядков превышает содержание золота. А одним из лучших доказательств такого явления является устойчивая прямая корреляция содержаний Au и Bi в руде в целом, а не по-минерально.

- из текста не ясно, о каком уровне содержания Ag в рудах идет речь, следовательно, не всегда можно оценить актуальность полученных результатов о носителях серебра. Кроме того, не приводятся сведения о содержании серебра в галените, который, в свою очередь, также может выступать в качестве минерала-концентратора;

- на стр. 90 говорится о двух генерациях бертьерита («...чистый бертьерит... является наиболее ранним...бертьерит в ассоциации с джемсонитом (более поздний)...»). Тогда как на рис. 2.2. Схема последовательности... положение бертьерита и джемсонита демонстрируют обратную картину;

- делать заключение о микроэлементном составе стадий минералообразования на основании *in-situ* анализов минералов не совсем правильно. Скорее соискателю следовало бы провести сопоставление химизма отдельных минералов и валового мультиэлементного состава руд. При таком подходе можно бы было более обосновано говорить о геохимическом портрете минерализации;

- необоснованным выглядит заключение по главе, которое постулирует связь источника рудного вещества с магматическими породами и глубинными мантийными процессами. По меньшей мере, из материалов, представленных в третьей главе, такой вывод однозначно не вытекает.

Глава четвертая «Золото в арсенопирите» посвящена всестороннему исследованию арсенопирита с позиции минерала-концентратора «невидимого» золота. Материалы, изложенные в главе, положены в основу первого защищаемого положения. Результаты исследования структурированы, повествование логичное. Текст сопровождается необходимым количеством иллюстраций, выступающих в качестве аргументов. Выводы обоснованы и вытекают из фактического материала. Единственным замечанием к главе является отсутствие дискуссии о возможном нахождении связанного золота в виде октаэдрических комплексов $AuAs_2$, $AuAsS$ и AuS_2 .

В пятой главе обсуждаются параметры рудообразования. Фактической основой главы явились результаты термобарогеохимических исследований флюидных включений в кварце и рудных минералах в совокупности с данными о температурах формирования, оцененных при помощи геотермометров. Результаты такого исследования позволили

сделать автору вывод об условиях формирования дорудной, рудной и пострудной стадий минералообразования и сформулировать второе защищаемое положение. К недостаткам главы можно отнести отсутствие представительных рамановских спектров, полученных при анализе газовой фазы индивидуальных включений. Кроме того, к материалам пятой главы есть некоторые замечания:

- результаты изучения индивидуальных газовой-жидких включений представлены для (1) не золотосодержащей ранней, (2) золото-мышьяковистой, (3) золото-сурьмяной и (4) пострудной ассоциаций. Указанные ассоциации не всегда очевидно могут быть сопоставлены с выделенными в Главе 2 ассоциациями (рис. 2.2);

- по данным криометрии (табл. 5.5, стр. 136), температуры плавления газовой фазы в индивидуальных флюидных включениях для незолотосодержащей, золото-мышьяковистой и золото-сурьмяной ассоциаций практически идентичны, хотя, судя по результатам рамановской спектроскопии (рис. 5.4, стр. 126 и табл. 5.2, стр. 127), очевидно существенно большее содержание азота в газовой фазе включений из золото-мышьяковистой ассоциации.

Глава шестая состоит из двух разделов. Первый раздел посвящен вопросам источников рудного вещества, второй — геохронологическим исследованиям. В диссертационном исследовании Сергей Анатольевич предпринимает попытку обоснования источников и природы рудного вещества на основании большого количества изотопных и геохимических данных. Недостатком первого раздела является использование большого количества литературных данных при весьма скромном вкладе соискателя. На взгляд рецензента, было бы более обосновано углубить дискуссию, базирующуюся на собственных данных, а литературные источники использовать в качестве сравнения и проверки гипотезы. Геохронология рудообразующих процессов базируется на 16 определениях Ar-Ar возраста. Результаты, изложенные соискателем в главе, позволили уточнить имеющиеся представления о природе рудного вещества и времени формирования Олимпиадинского месторождения, а также сформулировать **третье защищаемое положение**. К шестой главе имеется ряд замечаний:

- при интерпретации изотопного состава серы сульфидов не рассматриваются варианты фракционирования в открытой/закрытой системах, а также вероятного механизма сульфат-редукции (био/термо-сульфат-редукция);

- при интерпретации изотопного состава осмия и гелия следовало бы рассмотреть не только гипотетический «мантийный» источник, который маловероятен исходя из общей геологической позиции месторождения, но и «унаследованную» природу мантийных меток;

- вывод о «более глубинном источнике рудного вещества, на который может указывать резко отличное распределение REE и PGE в сурьмяных минералах...» (стр. 150-151) не правомерен. Полученные значения REE характеризуют не рудные минералы, а минеральные включения в них (см. комментарии к третьей главе), а содержание анализируемых PGE (Rh, Pd, Ir и Pt), согласно разделу 3.2.1. стр. 73, во всех анализах оказались ниже предела обнаружения;

- следовало бы привести фотографии образцов, из которых отбиралась навеска серицита для Ag-Ag анализа;

- на рис. 6.5.(в), третий сверху возрастной спектр не может быть использован для оценки времени формирования серицита. На данном спектре отсутствует возрастное плато, следовательно, возраст 660 ± 19 млн лет не соответствует действительности;

- не ясно, на каком основании соискатель игнорирует полученные Ag-Ag возраста для золото-сурьмяной ассоциации (Рис. 6.5 (в) $757,7 \pm 5,9$ и $718,8 \pm 5,6$ млн лет), а опирается при формулировке защищаемого положения на спектр с отсутствующим плато и более ранние значения возраста, полученные другими методами. Стоило бы провести обсуждение такого выбора;

- не обоснована попытка увязать формирование золоторудной минерализации с «... основной стадией мантийного и мантийного-корового гранитоидного магматизма...». Рецензенту не известны примеры мантийного магматизма с возрастом $ca. 800$ млн лет на территории Енисейского кряжа. Более стройно и логично выглядит модель, предполагающая увязку процессов формирования основного объема минерализации с периодом коллизионного метаморфизма.

Несмотря на перечисленные замечания, работа является оригинальным законченным исследованием и содержит новые и чрезвычайно интересные данные и является важной вехой в понимании природы золотого оруденения в осадочных толщах. Цели и задачи исследования сформулированы четко и, в основном, выполнены. Автореферат в полной мере отражает содержание диссертационной работы. Защищаемые положения являются оригинальными, достаточно убедительно аргументированными и

опубликованы в восьми статьях в журналах из списка ВАК, а также доложены на ряде российских и международных конференциях.

Диссертация соответствует критериям, установленным п. 9 «Положения о порядке присуждения ученых степеней» (постановление Правительства Российской Федерации от 24.09.2013 г. №842) для ученой степени кандидата наук, а её автор, Сильянов Сергей Анатольевич, несомненно заслуживает присуждения ученой степени кандидата геолого-минералогических наук по специальности 25.00.11 – Геология, поиски и разведка твердых полезных ископаемых, минерагения.

Официальный оппонент,
кандидат геолого- минералогических наук,
и.о. заведующего лабораторией
Лаборатория рудообразующих систем
Институт геологии и минералогии им. В.С. Соболева СО РАН
630090, г. Новосибирск, проспект Академика Коптюга д. 3
www.igm.nsc.ru
nevolko@igm.nsc.ru
+7(383) 373-02-26 (доб. 710).

Я, Неволько Петр Александрович, даю согласие на включение своих персональных данных в документы, связанные с работой диссертационного совета, и их дальнейшую обработку.

29 » марта 2021 года



Для удостоверения
Зав. канцелярией
Жилова Е.Е.
29.03.2021г.