

УТВЕРЖДАЮ

И.о. директора Института геохимии им. А.П. Виноградова  
Сибирского отделения Российской Академии наук,  
кандидат физико-математических наук

Шалаев Алексей Александрович

«13» сентября 2022 г.

## ОТЗЫВ ВЕДУЩЕЙ ОРГАНИЗАЦИИ

на диссертацию Девятяевой Анны Сергеевны

«КОЧУМДЕКСКИЙ КОНТАКТОВЫЙ ОРЕОЛ СПУРРИТ-МЕРВИНИТОВОГО  
МЕТАМОРФИЗМА: МИНЕРАЛОГИЯ, ГЕОХИМИЧЕСКИЕ ОСОБЕННОСТИ,  
ИСТОРИЯ СТАНОВЛЕНИЯ»

на соискание ученой степени кандидата геолого-минералогических наук по специальности

25.00.05 – «минералогия, кристаллография»

Представленная диссертационная работа посвящена минералогическому и петролого-геохимическому изучению пород Кочумдекского контактового ореола высокотемпературного спуррит-мервинитового метаморфизма в районе р. Кочумдек Восточной Сибири. Полученные данные о парагенезисах породообразующих и акцессорных, в том числе редких, минералов, условиях их термодинамической стабильности, зональности метаморфического ореола и соответствующем характере микро-, макроэлементного и изотопного фракционирования, а также геохронологические оценки использованы автором для восстановления температурной эволюции пород комплекса, флюидного режима метаморфизма и потенциальной роли ограниченного массопереноса в формировании высокотемпературного низкобарического метаморфического ореола.

### Актуальность исследования, научная новизна и практическая значимость исследования

По существующим в метаморфической петрологии представлениям формирование высокотемпературных низкобарических комплексов требует крайне специфических высокоградиентных и флюидненасыщенных условий, реализуемых наиболее часто в ореолах крупных базитовых интрузий. Примеров подобных комплексов не так много, при этом их петрологическая характеристика зачастую затруднена в силу высокой вариативности модельных систем для алюмосиликатных пород. Одним из возможных

подходов к решению данной проблемы является привлечение иных литологических типов метаморфизованных пород и использование для петрологических построений редких акцессорных, в том числе карбонатных и сульфидных, минералов. Для последних качественные парагенетические данные, ровно как и данные о поведении в экстремальных условиях, практически отсутствуют. В этой связи актуальность выполненной работы несомнена в рамках изложенных в диссертации аспектов, в том числе в разделе «Актуальность исследования», хоть и довольно сумбурно обоснована в аналогичном разделе автореферата. Используя в качестве эталонного объекта слабо охарактеризованный ранее Кочумдекский метаморфический ореол, автору удалось (1) детально охарактеризовать специфику метаморфической модификации карбонатных пород (мраморов и мергелистых известняков) и сменяемости состава карбонатно-силикатных ассоциаций как надежный парагенетический индикатор, (2) оценить пространственные масштабы и температурный профиль метаморфического ореола в диапазоне ~725–925°C, (3) установить преимущественно изохимическую природу метаморфизма в условиях малой активности  $H_2O$  и ограниченном влиянии метасоматоза фторсодержащим флюидом, (4) впервые детально охарактеризовать поведение и изоморфизм сульфидных минералов в наиболее высокотемпературных условиях (выше 900°C) и, таким образом, их потенциал в качестве дополнительного индикатора стадийности Р–Т эволюции пород, и (5) показать высокую степень фракционирования несовместимых элементов различной геохимической специализации в минеральных фазах высокотемпературных метакарбонатных пород. Таким образом, по целому комплексу аспектов исследования представленная диссертационная работа может выступать готовым алгоритмом к петрологическому изучению высоко- и ультравысокотемпературных метаморфических комплексов

В основу диссертационного исследования положены результаты минералого-петрографических и геохимических исследований, а также парагенетического анализа и изотопно-геохронологического датирования на базе коллекции из 78 образцов, исследование которых проведено комплексом современных и наиболее актуальных методов. Последние включали в себя средства сканирующей электронной микроскопии (СЭМ), рентгеноспектрального микроанализа (РСМА), колебательной спектроскопии (КР) и масс-спектрометрии с индуктивно связанный плазмой (ЛА-ИСП-МС) для исследования минеральных фаз; атомно-эмиссионной спектрометрии и масс-спектрометрии с индуктивно связанный плазмой – для характеристики макро- и микроэлементного состава пород. Исследования проведены на оборудовании Центра коллективного пользования ИГМ СО РАН (г. Новосибирск) и ЮУ ФНЦ МиГ УрО РАН (г. Миасс). Изотопно-

геохимические исследования по минеральным монофракциям (изотопный состав серы) и in-situ (U-Pb датирование перовскита) задействовали оборудование ЦКП ИГМ СО РАН и Университета Тасмании (г. Хобарт), соответственно.

По теме диссертации автором опубликовано 14 работ, в том числе 7 статей в российских и зарубежных журналах, входящих в Перечень рецензируемых научных изданий, в которых должны быть опубликованы основные результаты диссертаций на соискание ученой степени кандидата наук, на соискание ученой степени доктора наук. Помимо этого, полученные результаты апробированы в рамках представленных материалов на 7 российских и международных конференциях.

На основании полученных результатов автором сформулировано 3 защищаемых положения:

1. Кочумдекский ореол спуррит-мервинитового метаморфизма был сформирован при однократном термическом воздействии траппа кузьмовского комплекса ( $v\beta T_1 k z$ ) на мергелистые известняки ( $S_1 ln$ ). Возраст термического события –  $248.0 \pm 7.2$  млн. лет. При  $P_{общ} \approx 0.2$  кбар и  $P_{CO_2} \geq 0.3-0.4$   $P_{общ}$  температура прогрева метаосадков в зоне контакта превышала  $925^{\circ}C$  и снижалась до  $725^{\circ}C$  на расстоянии 3 м. Термический градиент достигал  $\sim 135^{\circ}C/m$ .

2. В Кочумдекском ореоле сульфиды являются независимыми индикаторами источников вещества и режима метаморфизма. Твердые растворы  $(Zn_{0.6}Fe_{0.3}Mn_{0.1})S_{куб}$ ,  $(Zn_{0.4}Mn_{0.3}Fe_{0.3})S_{текс}$  и  $(Mn_{0.8}Fe_{0.2})S_{куб}$  аномально широкого диапазона составов сформировались в мраморах при пиковой температуре метаморфизма  $\sim 900^{\circ}C$ . Источником серы метаморфогенных сульфидов ( $\delta^{34}S = -25.4 \div -15.1\text{‰ CDT}$ ) был исходный осадок. На ретроградном этапе ( $T = 650-400^{\circ}C$ ) возникли соединения Fe-K-S( $\pm Cl$ ), образование и локализацию которых контролировал ограниченный флюидопоток из остывающего траппа.

3. Петро- и геохимические характеристики мраморов были унаследованы от нижнесилурийских мергелистых известняков и отвечают тренду смешения пелитового материала и биогенно-осадочного  $CaCO_3$ . Высокотемпературный контактовый метаморфизм в Кочумдекском ореоле не сопровождался заметным транспортом вещества из габброидов в термически преобразованные осадки. Только в ретроградных акцессорных минералах мраморов были обнаружены Ni, Co, Cu, Sc, Cl – геохимические «метки» габброидов.

Исходя из основного содержания диссертационной работы и автореферата, приведенные защищаемые положения выглядят достаточно обоснованными с позиции оригинальных данных, полученных автором, и их интерпретации в свете трех ключевых

аспектов исследования – термального и флюидного режима метаморфизма, а также индикаторной роли сульфидных и карбонатно-силикатных ассоциаций в процессах высокотемпературной метаморфической модификации пород или осадков преимущественно карбонатного состава.

### **Содержание диссертационной работы и обсуждение результатов**

Диссертационная работа объемом 231 страница состоит из введения, 5 глав, заключения и списка литературы из 203 наименований, содержит 49 рисунков, 37 таблиц и 1 приложение.

В главе 1 приведен краткий очерк геологического строения района работ на основании обзора ранее выполненных геологических работ, минералого-геохимических и петрологических исследований. Приводится в достаточной степени детальная характеристика геологического строения, основных структурных мотивов, стратиграфии, включая положение метаморфизованных силурийских отложений, их седиментационной природы и палеогеографических особенностей осадконакопления. Обзор существующих геолого-геохронологических данных для интрузивных комплексов Тунгусской синеклизы содержит лишь единственную ссылку на Гусева с соавторами (2019), и стоило его расширить с учетом приведенного перечня геохронометров и анализируемых минералов, а также недавно полученных результатов прямого датирования магматических пород траппового комплекса и ассоциирующих с ними пород того же возрастного этапа (к примеру, Ivanov et al., 2021, Geochemical Perspective Letters; Marfin et al., 2020, Economic Geology). Описание проявления высокотемпературных, в том числе спуррит-мервинитовых комплексов ограничено в силу малой изученности, в связи с чем одним из существенных преимуществ работы здесь выглядит детальное описание положения и зональности Кочумдекского ореола по оригинальным авторским данным, полученное в том числе в результате собственных полевых наблюдений. Отметим, однако, что описание характера модификации карбонатных осадков несколько не согласовано: автором повсеместно отмечается присутствие зоны гранат-пироксеновых скарнов (метасоматитов) между высокотемпературными метакарбонатами зоны 2 и траппом, однако по тексту «метаморфизм спуррит-мервинитового уровня... не сопровождался выраженными явлениями скарнирования» (с. 37), «слагающие его породы отличает... отсутствие метасоматических изменений» (с. 49) и далее по тексту.

Глава 2 посвящена характеристике использованных в исследованиях материалов и аналитических методов. Описанная стратегия первичного отбора наименее измененных образцов для лабораторных работ имеет один распространенный для петрологических исследований недостаток. Если одной из подразумеваемых задач работы является

определение характера и степени ретроградных метаморфических/метасоматических преобразований, не представляется приемлемым исходное исключение из работы образцов с хорошо выраженным ретроградным наложением, приводящее зачастую к недооценке проявления соответствующих процессов. Иначе стоило указать, что степень ретроградных преобразований оценивалась в целом по ключевым толщам метакарбонатов, тогда как для изучения пиковых высокотемпературных парагенезисов использовались лишь визуально наиболее свежие разности. Набор использованных авторов методов, в частности локального анализа, впечатляет, а их описание использованных аналитических методов достаточно полное, но не везде содержит всю необходимую информацию, включая, к примеру, процедуры стандартизации (внешних/внутренних стандартов, калибровки, градуировки и т.п.) (для АЭС-ИСП, МС-ИСП), уровне инструментальной/общей неопределенности измерений для разных элементов или изотопов (в частности, для ЛА-МС-ИСП). На наш взгляд, для описания методических особенностей подхода в диссертации, во многом базирующейся на локальных и прецизионных методах, недостаточно одних ссылок на ранее опубликованные работы.

Глава 3 посвящена собственно характеристике пород, слагающих Кочумдекский контактовый ореол, включая интрузивные/гипабиссальные фации, мраморы и известняки различной степени высокотемпературного метаморфического преобразования, и более редкие метасоматические, в том числе жильные образования. Приведено детальное описание минерало-петрографических особенностей пород, их петрохимической специфики. Отдельно стоит отметить детальную систематизацию обнаруженных парагенезисов в виде наглядных таблиц (к примеру, на стр. 52), рисунков и диаграмм. Ряд мелких замечаний здесь можно отнести к используемой терминологии. В частности, едва ли можно отнести к долериту породу основного состава с размером зерен до 8 мм. Биотиты не могут быть «обогащены FeO, TiO<sub>2</sub>» (с. 51) и иными компонентами сами по себе – только относительно каких-то эталонов сравнения. Систематически по тексту приводятся содержания главных оксидов с разным количеством значимых цифр, а магнезиальность (#Mg) – скорее безразмерная величина и не может выражаться в мольных %. Кроме того, едва ли стоит расчетные доли минералов в минералах приводить с дробными частями (как, например, для ортопироксена и клинопироксена на с. 51), неопределенность, обусловленная самим анализом и использованием моделей твердых растворов как правило исключает такую возможность. Наконец, не совсем ясно, почему петрохимические характеристики приводятся и в разделе 3.1 совместно с

минералогическими характеристиками пород, и в следующем по порядку разделе с соответствующим названием.

Некоторые вопросы и замечания к содержанию данной главы:

- каким образом близость отношений содержания  $\text{SiO}_2$ ,  $\text{Al}_2\text{O}_3$  и  $\text{MgO}$  в породах или осадках может указывать на единый источник силикатного материала? (с. 57). По петрохимическим данным источник может быть только петро- и/или геохимически схожий или аналогичный, об единстве источника без привлечения изотопных данных рассуждать проблематично;

- как минералогически контролируется сохранение/удаление  $\text{K}_2\text{O}$  в метакарбонатных прослоях? Из рассуждения на с. 59 логично предположить, что калий удаляется в силикатные прослои, но дальнейшее изложение, отраженное в защищаемом положении №2, этому противоречит (предполагается вынос калия и ряда иных компонентов из траппов);

- чем обусловлены «пилообразные» спектры распределения РЗЭ для пород/осадков и выщелочек, связанные с наличием одиночных максимумов или минимумов по Sm, Tm, Yb и иногда другим элементам наряду с привычными и интерпретируемыми аномалиями по Ce-Eu-Y (рис. 3.5)? Зачастую подобное связано с низкой чувствительностью метода по отношению к полученным пробам/вытяжкам, но на приводимом уровне содержаний данный фактор не должен иметь существенного влияния;

- насколько уместно и целесообразно использовать для дискриминации преимущественно карбонатных осадков по составу диаграммы, исходно созданные для силикакластических пород, учитывая принципиально различный характер концентрирования некоторых ключевых элементов (La, Th) в карбонатах и силикатах? (рис. 3.7);

- тезис о прямой корреляции  $\text{Zr}/\text{Hf}$  отношения с генезисом датритового циркона в породах/осадках (с. 71) является слишком далеким и не подтверждается в работе эмпирическими данными. Напротив, здесь же автором предполагается крайне неоднородное распределение этих высокозарядных элементов и присутствие целого ряда иных минералов-концентраторов.

Глава 4 является самой объемной и, пожалуй, ключевой в диссертационной работе, поскольку содержит информацию как о наблюдаемых парагенетических ассоциациях, так и их характерной сменяемости в процессе высокотемпературного метаморфизма, на чем основаны все петрологические построения в работе и два из трех защищаемых положений. Приведенная в главе минералогическая характеристика является исчерпывающей, снабжена таблицами и проиллюстрирована большим количеством

представительных фотоматериалов и картин элементного распределения, что несомненно является одним из главных достоинств работы. Из общих замечаний к данной главе стоит выделить присутствие все тех же недостатков в презентации результатов измерений, что указаны в комментариях к главе 3, а также, на наш взгляд, чересчур подробное описание минералогии базитов. Последние по сути не рассматриваются в диссертации в свете ключевого процесса высокотемпературного метаморфизма, поэтому столь детальная их характеристика выглядит чрезмерной и излишней. Единственное частное замечание относится к формулировке «... сульфидов магматического происхождения...» загрязненных изотопно-тяжелым сульфатом...», которая не корректна или нуждается в объяснении. Идет ли здесь речь о смешении серы двух разных источников при кристаллизации магматических сульфидов или о захвате сульфидов сульфатов в каком-либо виде (включений и т.п.), или о чем-то ином? В обоих случаях механизм генерации изотопных вариаций с минералогическими позиций необходимо было прояснить.

В главе 5 приводится обсуждение полученных результатов. Раздел, посвященный петрологическому обоснованию температурных оценок на основании наблюдаемых парагенезисов и изоморфизма главных породообразующих фаз, полностью базируется на наблюдениях автора с привлечением существующих термодинамических данных, хоть их корректность и приводится относительно уже существующих представлений. Вместе с тем, автор пошел значительно дальше этих представлений, пересмотрев диапазон возможных значений  $P_{CO_2}$ , используя классический инструментарий парагенетического анализа. В качестве пожелания здесь стоит привести тот факт, что приведенная на с. 171 диаграмма не соответствует выявленному диапазону  $P_{CO_2}$  и, таким образом, не является полностью релевантной для полученных оценок. Этот пробел частично восполняет диаграмма 5.5, которая резюмирует интерпретацию условий проградного этапа метаморфизма пород. Кроме того, обсуждаемые минеральные равновесия на диаграммах 5.4 и 5.5 для спуррит-мервинитовой фации метаморфизма карбонатно-силикатных осадочных пород были получены достаточно давно (Перцев, 1977) в результате физико-химического моделирования системы  $CaO-MgO-SiO_2-CO_2-H_2O$ , которое не учитывает известные особенности фазовой диаграммы  $CaCO_3$  в низкобарической ( $\leq 100$  МПа) области, где в водном флюиде при  $T > 650-700$  °C (Wyllie, Tuttle 1960; Gittis, Tuttle 1964; Durand et al., 2015) и в водно-углекислотном флюиде при  $T > 900$  °C (Wyllie 1960; Wyllie, Boettcher 1969; Persikov, Bukhtiyarov 2004; Peretyazhko et. al, 2021) кальцит может плавиться с образованием карбонатного расплава (т.е. без разложения  $CaCO_3$  и образования за счет этого избыточного  $CaO$  и  $CO_2$ ).

Не менее значимыми являются разделы, посвященные детальной реконструкции регressiveного метаморфизма в условиях ограниченного массопереноса (по характеру симплектитовых структур и результатам масс-баланса) и интерпретации минерало-геохимических и изотопных данных по сульфидным минералам.

Заключительный раздел диссертационной работы отражает главные результаты проведенных исследований, акцентируя внимание на их актуальности и научной новизне.

### **Заключение по диссертации**

Уровень проведенного научного исследования достаточно высок и соответствует современным квалификационным требованиям. Автореферат и опубликованные материалы отражают основное содержание диссертации. Диссертационная работа «Кочумдекский контактовый ореол спуррит-мервинитового метаморфизма: минералогия, геохимические особенности, историй становления» удовлетворяет требованиям п. 9-10 действующего Положения о присуждении ученых степеней, предъявляемым к кандидатским диссертациям, а ее автор Девятаярова Анна Сергеевна заслуживает присуждения ученой степени кандидата геолого-минералогических наук по специальности 25.00.05 – «минералогия, кристаллография».

Отзыв подготовлен старшим научным сотрудником лаборатории геохимии изотопов Института геохимии им. А.П. Виноградова Сибирского отделения Российской Академии наук, кандидатом геолого-минералогических наук Скузоватовым Сергеем Юрьевичем и ведущим научным сотрудником, заведующим лабораторией физико-химической петрологии и генетической минералогии Института геохимии им. А.П. Виноградова Сибирского отделения Российской Академии наук, доктором геолого-минералогических наук Перетяжко Игорем Сергеевичем. Отзыв на диссертационную работу Девятаяровой Анны Сергеевны рассмотрен и одобрен в качестве официального отзыва ведущей организации на заседании Ученого совета ИГХ СО РАН 13 сентября 2022 года, протокол №8.

Старший научный сотрудник лаборатории геохимии изотопов  
Института геохимии им. А.П. Виноградова  
Сибирского отделения Российской Академии наук,  
кандидат геолого-минералогических наук  
(25.00.05 – минералогия, кристаллография)

Скузоватов Сергей Юрьевич

Я, Скузоватов Сергей Юрьевич, даю согласие на включение моих персональных данных в документы, связанные с работой диссертационного совета, и их дальнейшую обработку.

Ведущий научный сотрудник, заведующий лабораторией  
физико-химической петрологии и генетической минералогии  
Института геохимии им. А.П. Виноградова  
Сибирского отделения Российской Академии наук,  
доктор геолого-минералогических наук  
(25.00.05 – минералогия, кристаллография)

Перетяжко Игорь Сергеевич

Я, Перетяжко Игорь Сергеевич, даю согласие на включение моих персональных данных в  
документы, связанные с работой диссертационного совета, и их дальнейшую обработку.

Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт геохимии им. А.П.  
Виноградова Сибирского отделения Российской Академии наук (ИГХ СО РАН)  
Адрес: 664033, г. Иркутск, ул. Фаворского, д. 1А.

Тел.: (3952)426600. E-mail: [dir@igc.irk.ru](mailto:dir@igc.irk.ru) Сайт: <http://www.igc.irk.ru>

