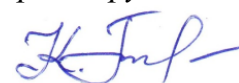


*На правах рукописи*



**Бестемьянова Ксения Викторовна**

**МИНЕРАЛЬНЫЙ СОСТАВ, ВОЗРАСТ И ГЕНЕЗИС  
БАРИТ-ПОЛИМЕТАЛЛИЧЕСКИХ МЕСТОРОЖДЕНИЙ  
ЗМЕИНОГОРСКОГО РУДНОГО РАЙОНА (РУДНЫЙ АЛТАЙ)**

Специальность: 1.6.10 – Геология, поиски и разведка  
твердых полезных ископаемых, минерагения

**АВТОРЕФЕРАТ**

диссертации на соискание ученой степени  
кандидата геолого-минералогических наук

Томск – 2026

Работа выполнена в Федеральном государственном автономном образовательном учреждении высшего образования «Национальный исследовательский Томский государственный университет», г. Томск.

**Научный руководитель:**

**Гринев Олег Михайлович,**  
кандидат геолого-минералогических наук, доцент  
кафедры палеонтологии и исторической геологии,  
Федеральное государственное автономное  
образовательное учреждение высшего образования  
«Национальный исследовательский Томский  
государственный университет», г. Томск

**Официальные  
оппоненты:**

**Ворошилов Валерий Гаврилович,**  
доктор геолого-минералогических наук, профессор  
отделения геологии инженерной школы природных  
ресурсов, Федеральное государственное автономное  
образовательное учреждение высшего образования  
«Национальный исследовательский Томский  
политехнический университет», г. Томск

**Гаськов Иван Васильевич,**  
доктор геолого-минералогических наук, ведущий  
научный сотрудник лаборатории рудообразующих  
систем, Федеральное государственное бюджетное  
учреждение науки Институт геологии и минералогии  
им. В.С. Соболева СО РАН, г. Новосибирск

**Ведущая организация:**

Федеральное государственное автономное  
образовательное учреждение высшего образования  
«Сибирский федеральный университет», г. Красноярск

Защита состоится 2 апреля 2026 г. в 10-00 часов на заседании диссертационного совета 24.1.053.01 при Федеральном государственном бюджетном учреждении науки Институте геохимии им. А.П. Виноградова Сибирского отделения Российской академии наук (ФГБУН «ИГХ СО РАН»).

Адрес: 664033, г. Иркутск, ул. Фаворского, 1а.  
e-mail: [j.tarasova84@yandex.ru](mailto:j.tarasova84@yandex.ru)

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке и на сайте ФГБУН Института геохимии им. А.П. Виноградова СО РАН, адрес сайта: [www.igc.irk.ru/ru/zashchita](http://www.igc.irk.ru/ru/zashchita)

Автореферат разослан «\_\_» февраля 2026 г.

Ученый секретарь  
диссертационного совета 24.1.053.01  
К. Г.-М. Н

Ю.И. Тарасова

## ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

**Актуальность исследования.** Рудноалтайский полиметаллический пояс одноименного мегапрогиба является одним из крупнейших в мире по концентрации свинцово-цинковых руд (более 25 крупных и средних месторождений), благодаря которым на протяжении трех сотен лет территория Рудного Алтая входит в пятерку лидеров по запасам и прогнозным ресурсам категории  $P_1$  на территории Российской Федерации. В настоящее время отрабатываются Корбалихинское и Зареченское (Змеиногорский рудный район), Таловское и Степное месторождения (Рубцовский рудный район), а также ведутся поисковые работы на флангах уже известных объектов и на прилегающих недоизученных рудных полях.

Месторождения пояса представлены колчеданно-полиметаллической формацией, проблема их образования остается дискуссионной и актуальной. Существуют представления, позволяющие говорить о связи формирования месторождений колчеданно-полиметаллической формации с интрузивным гранитным магматизмом (В.П. Нехорошев, П.Ф. Иванкин, А.К. Каюпов, В.С. Кузечный) или же с процессами вулканизма (Л.Н. Белькова, Б.Н. Вейц, И.В. Дербигов, В.Н. Огнев, Т.Н. Шадлун, Г.Н. Щерба), проявляющимися на изучаемой территории на протяжении всего девонского периода и характеризующимися антидромной направленностью (Большой Алтай, 1998; Промыслова, 2005, Гаськов, 2018; Куйбида, 2019, Серавкин, 2019).

Медно-свинцово-цинковые руды сосредоточены в девонских вулканогенно-осадочных толщах, где на нижнем стратиграфическом уровне ( $D_1$ ) фиксируются рудные объекты исключительно барит-полиметаллической субформации, на среднем и верхнем ( $D_{2+3}$ ) колчеданно-полиметаллической. Большинство исследователей рудноалтайских месторождений (Белькова, 1954; Венцловайтэ, 1969; Щерба, 1977; Авдонин, 1980; Чекалин, 1991, 1996; Попов, 1995; Услугин, 2001; Кузнецова, 2023) условия образования, в том числе и механизмы формирования руд, для барит-полиметаллических объектов рассматриваются в едином ключе со всей колчеданно-полиметаллической формацией региона. Однако структурная приуроченность и вещественный состав руд барит-полиметаллических месторождений позволяют предполагать несколько отличные условия их формирования. Комплексное изучение особенностей минералого-геохимического и изотопно-геохимического состава рудных минералов, образованных в пределах парагенезисов, выявление возраста оруденения и физико-химических условий, определение возможных источников вещества позволят установить механизм и реконструировать условия образования руд представленной субформации.

Проведенные исследования руд барит-полиметаллических месторождений Змеиногорского рудного района выполнены на представительном каменном материале, с применением современных методов изучения минерального вещества. Они не только существенно конкретизируют результаты работ предшественников, но и выводят изученность месторождений на новый современный уровень, что позволяет уточнить поисковые критерии новых барит-полиметаллических объектов Змеиногорского рудного района.

**Объектами исследования** являются три месторождения барит-полиметаллической субформации Змеиногорского рудного района (Змеиногорско-Зареченское рудное поле, северо-западная часть Рудного Алтая) – Стрижковское, Зареченское, Змеиногорское.

**Целью** исследования является реконструкция условий формирования барит-полиметаллических месторождений Змеиногорского рудного района (Рудный Алтай).

В ходе исследований решались следующие **задачи**:

- 1) Анализ структуры месторождений: условий залегания, состава вмещающих и околорудноизмененных пород, морфологии и строения рудных тел;
- 2) Выделение парагенетических ассоциаций на основе детального минераграфического анализа и определение последовательности формирования месторождений;
- 3) Определение вероятного источника вещества на основе изотопных исследований серы сульфидов, углерода и кислорода кальцита;

4) Выявление возраста формирования барит-полиметаллических месторождений Змеиногорского рудного района по данным  $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$  датирования серицита околорудных метасоматитов;

5) Изучение состава и параметров минералообразующей среды по результатам исследования флюидных включений.

**Фактический материал и методы исследования.** В основу работы положен каменный материал – образцы и пробы пород и руд, собранные автором в результате полевых работ, проводившихся в Змеиногорском рудном районе в 2012 – 2015, 2017 гг., а также материал из фондов НИЛСГиТ НИ ТГУ. Всего автором было изучено более 350 образцов горных пород и руд Змеиногорского, Стрижковского и Зареченского месторождений, из которых 245 образцов с рудной минерализацией, 25 образцов околорудноизмененных и 20 вмещающих пород, 20 образцов магматических образований. В ходе исследований изготовлено и изучено 45 шлифов, 130 аншлифов, 40 плоскопараллельных пластинок.

Оптические исследования выполнены на поляризационном микроскопе Leica DM750P, при проходящем и отраженном свете. Выполнено свыше 250 локальных определений химического состава рудных и пороодообразующих минералов рентгеноспектральным микроанализом (PCMA, на сканирующих электронных микроскопах Tescan Vega II LMU, совмещенного с энергодисперсионным спектрометром INCA Energy 350 и Tescan Mira III LMU, совмещенного с энергодисперсионным спектрометром Ultim Max 40). Проанализировано 16 проб на микрокомпонентный (ICP-MS, на масс-спектрометре Agilent 7500 cx), 20 проб на макрокомпонентный состав вмещающих туфов и околорудных метасоматитов (РФА, на рентгеновском спектрометре ARL-9900-XP) в Аналитическом центре геохимии природных систем (НИ ТГУ, г. Томск), 42 пробы на содержания золота и серебра (на атомно-абсорбционном спектрофотометре Solaar M6) в центре коллективного пользования научным оборудованием много-элементных и изотопных исследований ИГМ СО РАН (г. Новосибирск). Выполнено 32 анализа изотопов серы сульфидов, 6 анализов углерода и кислорода кальцита в Аналитическом центре ДВГИ ДВО РАН (на изотопном масс-спектрометре Finnigan MAT 253, в лаборатории стабильных изотопов, г. Владивосток), 286 точечных криотермометрических исследований газовой-жидких включений в кварце, барите, сфалерите, кальците (с использованием термокамеры THMSG-600 фирмы Linkam, с диапазоном измерений температур от  $-196$  до  $+600$  °C), 10 оригинальных газовой-хроматографических анализов монофракций сульфидов, кварца, кальцита и барита (на хромато-масс-спектрометре ThermoScientific (USA) DSQ II MS/Focus GC и SCION SQ Premium) в лаборатории термобарогеохимии ИГМ СО РАН (г. Новосибирск), 50 точечных определений состава индивидуальных включений методом рамановской спектроскопии (на дисперсионном конфокальном микроскопе комбинационного рассеяния Termo Fisher Scientific DXR2) на базе отделения геологии ИШПР НИ ТПУ (г. Томск). Выполнено  $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$  датирование для девяти образцов серицита околорудных метасоматитов, подстилающих и рудовмещающих пород (на масс-спектрометре «noble gas 5400» фирмы Micromass методом ступенчатого прогрева, на основе полноценного плато) в лаборатории изотопно-аналитической геохимии ИГМ СО РАН (г. Новосибирск).

**Личный вклад автора** заключается в постановке цели и задач исследования, выборе методики исследования. На всех этапах исследований, автор занимался сбором и систематизацией фактического материала (в том числе в полевых условиях), подготовкой проб и специализированных препаратов, необходимых для проведения аналитических работ и непосредственно самостоятельным проведением аналитических исследований. Автором лично выполнено минералогическое изучение руд, оптическое изучение околорудных и рудовмещающих пород, электронно-микроскопические исследования, рентгеноспектральный микроанализ, криотермометрические определения, а также расшифровка и интерпретация всех полученных аналитических данных. Также автором сформулированы защищаемые положения, проанализирован обширный научный материал, опубликованный по теме диссертации.

### **Защищаемые положения.**

1. Гидротермальное рудообразование Стрижковского, Зареченского и Змеиногорского месторождений характеризуется последовательно сменяющимися друг друга парагенетическими ассоциациями: хлорит-серицит-кварцевой → галенит-халькопирит-сфалеритовой → гематит-кальцит-баритовой. На Зареченском и Змеиногорском месторождениях процесс рудогенеза имеет отличительную особенность – появление поздних халькозин-теннантит-борнитовой и карбонат-гипсовой парагенетических ассоциаций.

2. По полученным данным  $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$  датирования серицита околорудных метасоматитов, а также изотопному составу серы сульфидов ( $\delta^{34}\text{S}$ ), формирование изученных барит-полиметаллических месторождений связано с пульсационным поступлением гидротермальных растворов, функционирующих с начала эмского времени ( $408 - 402 \pm 4.1$  млн. лет), и имеющих смешанный источник вещества – мантийный ( $0 \pm 2\%$ ) и коровый ( $-4.6 - -3.6\%$ ). Наложенный халькозин-теннантит-борнитовый парагенезис характеризуется облегченными значениями серы ( $-8.9 - -13.6\%$ ).

3. Минеральные ассоциации барит-полиметаллических месторождений Змеиногорского рудного района формировались гидротермальными растворами, насыщенными углекислотой и серосодержащими соединениями, в условиях постепенного снижения температуры от  $270$  до  $90^\circ\text{C}$ , на фоне увеличения солености (от  $1.5$  до  $9.5$  масс. %  $\text{NaCl}$  экв.).

**Научная новизна полученных результатов.** На основании авторских данных  $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$  датирования серицита околорудных метасоматитов дана оценка начала рудообразования в пределах Змеиногорского рудного района, которое соответствует раннему девону (пражский-эмские века). Также уточнен возраст метаморфизма подстилающих девонский рудовмещающий разрез серицит-хлоритовых пород корбалихинской толщи, который отвечает раннему-верхнему силуру.

Существенно дополнены данные о параметрах рудообразующей среды. Установлено, что формирование парагенетических ассоциаций барит-полиметаллических месторождений Змеиногорского рудного района (от более ранних к более поздним) происходило с увеличением солености (от  $1.5$  до  $9.5$  масс. %  $\text{NaCl}$  экв.), на фоне снижения температур ( $270$  до  $90^\circ\text{C}$ ) и при изменении давления  $0.53 - 0.01$  кбар.

Впервые проанализирован валовый состав газовой фазы методом газовой хромато-масс-спектрометрии (GC-MS) в минералах выделенных парагенезисов (с учетом последовательности их образования). Полученные автором данные показывают, что помимо основных компонентов, таких как водяной пар и углекислота, в составе флюида отмечаются серосодержащие и углеводородные соединения.

Автором определены изотопные характеристики углерода и кислорода кальцита кварц-карбонатных жил корбалихинской свиты, кальцита из гематит-кальцит-баритовой, и самой поздней карбонат-гипсовой парагенетических ассоциаций. Выявленные значения указывают на смешение рудоносного флюида с метеорными водами, в то время как источником углерода кальцита кварц-карбонатных жил являлся глубинный коровый флюид, а поздних рудных ассоциаций – раннедевонские вмещающие породы (известняки, алевролиты и аргиллиты).

Полученные автором изменения изотопных отношений  $\delta^{34}\text{S}$  сульфидов в процессе минералообразования, с учетом данных предшественников, позволили сделать выводы о роли полигенного (мантийного и корового) источника вещества при формировании барит-полиметаллических месторождений Змеиногорского рудного района.

Прецизионными методами получены актуальные данные по вещественному составу руд, автором выявлены не диагностированные ранее – гринокит, амальгамы серебра (шахнерит, евгенит), смешанные по составу амальгамы золота и серебра, галеновисмутит, самородный висмут, пильзенит, балканит, маккинстриит.

В результате комплексного исследования уточнена схема последовательности минералообразования барит-полиметаллических месторождений Змеиногорского рудного района.

**Теоретическая ценность и практическая значимость.** Результаты исследований позволяют реконструировать условия формирования барит-полиметаллических месторождений Змеиногорского рудного района, руды которых по своему составу являются комплексными (Cu-Pb-Zn + Au и Ag). На основании понимания процессов рудогенеза, тектонических условий и закономерностей размещения барит-полиметаллических месторождений, их вещественного состава, можно экстраполировать полученные данные при изучении схожих месторождений Рудного Алтая и других регионов. С учетом того, что некоторые объекты в настоящее время практически отработаны, то актуальной проблемой является наращивание запасов исследованного типа руд, в том числе и посредством совершенствования поисковых критериев.

**Апробация работы и публикации.** По теме диссертации автором лично и в соавторстве опубликовано более 28 научных работ, в том числе 4 в журналах, включенных в перечень ВАК, 5 в сборниках материалов конференций, представленных в изданиях, входящих в Web of Science и/или Scopus. Результаты исследований были представлены в виде устных и стендовых докладов на российских и международных конференциях: на Российской молодежной школе с международным участием «Новое в познании процессов рудообразования» (Москва, 2013, 2014, 2020); на международном симпозиуме студентов и молодых ученых имени академика М.А. Усова (Томск, 2014, 2016, 2021); на Всероссийской научно-практической конференции «Современные исследования в геологии» (Санкт-Петербург, 2015); на научно-практической конференции студентов, аспирантов и молодых ученых «Геология в развивающемся мире» (Пермь, 2015, 2016); на Байкальской молодежной научной конференции по геологии и геофизике (Горячинск, 2015); на XXI Всероссийской научной конференции «Уральская минералогическая школа» (Екатеринбург, 2015); на Всероссийской конференции «Месторождения стратегических металлов: закономерности размещения, источники вещества, условия и механизм образования» (Москва, 2015); на третьей международной конференции «Корреляция алтаид и уралид: магматизм, метаморфизм, стратиграфия, геохронология, геодинамика и металлогения» (Новосибирск, 2016); на Московской международной школе наук о Земле (Москва, 2016); на Всероссийской конференции с международным участием «Петрология магматических и метаморфических комплексов» (Томск, 2016, 2017); на XVIII международной междисциплинарной научной геоконференции «SGEM» (Албена, Болгария, 2018); на международной конференции по геохимии и смежным дисциплинам Goldschmidt (2018, 2021); на междисциплинарной молодежной научной конференции «Азимут ГЕОнаук» (Томск, 2020); на Всероссийской молодежной конференции памяти В.А. Глебовицкого (Санкт-Петербург, 2020); на Всероссийской конференции «Актуальные проблемы недропользования» (Санкт-Петербург, 2021); Всероссийской конференции с международным участием «Динамика и взаимодействие геосфер Земли» (Томск, 2021); на годовом собрании Российского минералогического общества «Минералогические исследования в интересах развития минерально-сырьевого комплекса России и создания современных технологий» (Апатиты, 2024).

**Объем и структура работы.** Диссертационная работа общим объемом 255 страниц, состоит из введения, основного текста в виде 7 глав, заключения и списка использованной литературы, включающего 219 наименований, работа содержит 52 иллюстрации и 30 таблиц.

**Благодарности.** Работа выполнена под руководством кандидата геолого-минералогических наук доцента О.М. Гринева, которому автор выражает благодарность и глубокую признательность.

Отдельную благодарность автор выражает д. г.-м. н. В.В. Врублевскому, к. г.-м. н. И.Ф. Гертнеру, декану ГГФ к. г.-м. н. П.А. Тишину за ценные замечания и всестороннюю помощь в процессе исследований.

За помощь при работе с фондовыми материалами, сборе каменного материала, обсуждении геологических аспектов Змеиногорского рудного района, автор бесконечно благодарит главного геолога ОАО «Горно-Алтайская экспедиция» Ю.Н. Бузоверова, главного и участкового геологов Зареченского рудника Ю.В. Васильева, В.И. Чурсинова. За возможность

отбора материалов и допуск на действующий Зареченский рудник автор благодарен генеральному директору ОАО «Сибирь-Полиметаллы» (Алтайский край) А.А. Тишеловичу.

Выполнению работы способствовало сотрудничество с лабораториями Института геологии и минералогии СО РАН (г. Новосибирск) в лице д. г.-м. н. А.В. Травина, д. г.-м. н. А.А. Томиленко, к. г.-м. н. Н.А. Гибшер, д. г.-м. н. С.З. Смирнова, к. г.-м. н. Е.О. Шапаренко, к. г.-м. н. М.А. Рябухи, которым автор выражает искреннюю благодарность. Глубокую признательность автор выражает всему коллективу кафедры минералогии и геохимии ГГФ НИ ТГУ, особенно к. г.-м. н. О.В. Бухаровой, ст. преподавателю Л.А. Зыряновой, к. г.-м. н. Э.Н. Кунгуловой за ценные советы и обсуждение результатов.

Также автор выражает искреннюю признательность доцентам кафедры палеонтологии и исторической геологии ГГФ НИ ТГУ к. г.-м. н. А.С. Семирякову и Р.Р. Адылбаеву за поддержку и помощь в работе, а также доценту кафедры динамической геологии к. г.-м. н. И.В. Афонину за ценные замечания и обсуждение исследований. Автор благодарен доценту отделения геологии инженерной школы природных ресурсов НИ ТПУ – к. г.-м. н. А.С. Рубану за помощь в проведении рамановской спектроскопии.

**Связь работы с научными проектами.** Данная работа выполнялась в рамках Госзадания Министерства науки и высшего образования РФ (проект №FSWM-2025-0015).

Во **введении** обосновывается актуальность темы исследования, определены объекты, цель и задачи исследования, описан фактический материал, сформулированы научная и практическая значимость работы, приведены защищаемые положения.

**Первая глава** «Состояние проблемы и история изученности Змеиногорского рудного района» содержит обзор научных представлений по проблематике исследования и основных характеристиках колчеданных месторождений, а также сведения об истории геологического изучения Змеиногорского рудного района.

**Во второй главе** «Методика исследований» изложены виды аналитических методов, используемых в работе, лабораторные условия, параметры выполнения, приведено количество исследуемых проб.

**В третьей главе** «Геологическое строение Змеиногорского рудного района и изученных месторождений» рассмотрены общие сведения о геолого-структурной характеристике Змеиногорского рудного района, а также изученных месторождений – Змеиногорского, Зареченского, Стрижковского.

**В четвертой главе** «Околорудноизмененные породы месторождений» изложены результаты минералого-петрографических и петрохимических исследований околорудных метасоматитов. Подробно рассмотрена минералогия главных, второстепенных и редких минералов. Приведены данные по  $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$  изотопному датированию серицита из околорудных метасоматитов изучаемых месторождений.

**В пятой главе** «Рудная минерализация» изложены результаты минералогических и минералогических исследований барит-полиметаллических руд. Охарактеризованы минеральные парагенезисы; главные, второстепенные, редкие минералы; формы проявления золота и серебра. Приведена последовательность минералообразования.

**В шестой главе** «Генетические аспекты формирования месторождений» приводятся результаты изучения стабильных изотопов серы сульфидов выделенных минеральных парагенезисов, изотопного состава углерода и кислорода кальцита, а также данные анализа флюидных включений в сфалерите, кварце, барите и кальците.

**В седьмой главе** «Условия образования барит-полиметаллических месторождений Змеиногорского рудного района» приведена обобщенная информация об условиях образования изученных месторождений. Приведена концептуальная схема формирования барит-полиметаллических месторождений Змеиногорского рудного района, составленная по совокупности полученных данных.

**В заключении** подведены итоги исследования, перечислены основные выводы.

**Характеристика объектов исследования.** Змеиногорское, Зареченское, Стрижковское барит-полиметаллические месторождения приурочены к прибортовой северо-западной части Змеиногорско-Быструшинского прогиба, который, в свою очередь является частью структуры второго порядка Рудноалтайского мегапрогиба (РАМП). В структуре РАМП помимо основных продольных разломов (северо-западного простирания) отмечается ряд сопряжённых с ними разломов субмеридионального, субширотного и северо-восточного направлений, в зонах пересечения которых и локализуются изученные рудные объекты (приложение А, рисунок 1).

В геологическом строении Змеиногорского рудного района, как и в строении месторождений, принимают участие отложения каледонского и герцинского структурных этажей (приложение А, рисунок 2). Первый представлен метаморфизованными породами корбалихинской свиты ( $PZ_{1kr}$ ); второй – вулканогенно-осадочными отложениями девона мельничной свиты ( $D_{1-2mn}$ ). Рассматриваемый рудный район характеризуется интенсивным распространением магматических образований, среди которых отмечаются субвулканические риолит-риодацитовые породы мельнично-сосновского комплекса ( $\lambda D_{1-2ms}$ ), а также интрузивные разности габбро-плагиогранит-лейкогранитового состава змеиногорского комплекса ( $vz_1, \delta z_1, \gamma \delta z_2, \rho \gamma z_2, \gamma z_3, \rho \gamma z_3, \gamma z_4, D_{2-3z1-4}$ ). Некоторыми исследователями по геологическим наблюдениям выделяется алейский габбро-тоналит-плагиогранитовый комплекс ( $va_1, \rho \gamma a_2, \gamma \delta_2, D_{1a}$ ) (Козлов, 1991; Мурзин, 2001; Туркин, 2008; Куйбида, 2009). Рудовмещающей является нижняя пачка раннедевонских и, в значительно меньшей степени верхняя пачка отложений, которые представляют собой ниже- ( $D_{1-2mn1}$ ) и верхнемельничную ( $D_{1-2mn2}$ ) подсвиты. Изученные месторождения локализуются в Алейском антиклинории, нарушенном разнонаправленными разломами, зонами срыва и дробления. Змеиногорское месторождение располагается в ядерной части антиклинория, на периферии кальдеры проседания (приложение А, рисунок 2 а). Стрижковское месторождение приурочено к своеобразному тектоническому клину, образованному сопряжением двух крупных разломов, и представляет собой горст-антиклинальную структуру с почти пологим залеганием пород (приложение А, рисунок 2 б). Наиболее сложное строение имеет Зареченское, представляя собой ограниченную продольными разломами грабен-синклинальную структуру, для которой характерно крутое, почти вертикальное падение выполняющих ее пород (приложение А, рисунок 2 в).

Рудные тела приурочены к зонам срыва, расщепления и отслаивания на контактах туфов кислого состава, хрупких кремнистых пород с известняками, известковистыми аргиллитами, туфопесчаниками, к приразломным зонам дробления кремнистых пород, реже кремнистых аргиллитов, алевролитов, известняков. На всех изученных объектах фиксируются окolorудные хлорит-серицит-кварцевые метасоматиты. Оруденение представлено усложненными линзо-, ленто- и штокверкообразными телами. В рудах всех трех изученных месторождений характерно наличие брекчированных обломков микрокварцитов, выполняющих линзообразные тела в лежащих боках месторождений.

## ОБОСНОВАНИЕ ЗАЩИЩАЕМЫХ ПОЛОЖЕНИЙ

### Первое защищаемое положение.

*Гидротермальное рудообразование Стрижковского, Зареченского и Змеиногорского месторождений характеризуется последовательно сменяющимися друг друга парагенетическими ассоциациями: хлорит-серицит-кварцевой → галенит-халькопирит-сфалеритовой → гематит-кальцит-баритовой. На Зареченском и Змеиногорском месторождениях процесс рудогенеза имеет отличительную особенность – появление поздних халькозин-теннантит-борнитовой и карбонат-гипсовой парагенетических ассоциаций.*

Барит-полиметаллическая минерализация на всех трех изученных объектах развита в виде сплошных, прожилковых, прожилково-вкрапленных, гнездово-вкрапленных, брекчиевых руд, сформированных несколькими парагенетическими ассоциациями.



Детальные наблюдения структурных взаимоотношений минеральных видов позволяют выделить последовательность минералообразования на изученных барит-полиметаллических месторождениях (приложение Б, рисунок 1).

Самый ранний минеральный парагенезис – **хлорит-серицит-кварцевый**, является результатом воздействия кислотного гидротермального флюида на вулканогенно-осадочные породы раннего девона, и представляет собой околорудные метасоматиты.

Основные минералы – кварц, серицит, хлорит; второстепенные – пирит, редкие – сфалерит, халькопирит, галенит. Хлорит-серицит-кварцевые метасоматиты выделяют в особую формацию, свойственную объектам колчеданного и колчеданно-полиметаллического типов (Жариков и др., 1998).

Наиболее распространенный породообразующий минерал околорудных пород – *кварц*, представлен: 1 – остроугольными порфировыми обломками (10 – 15 % породы); 2 – тонкозернистым кварцем, выполняющим основной объем метасоматитов, а именно серицит-кварцевой матрицы (75 – 80 % породы); 3 – более поздними мономинеральными кварцевыми прожилками (5 – 10 % объема породы). *Серицит* образует скрыточешуйчатые массы, в тесной ассоциации с кварцем, весьма редко образует самостоятельные чешуйки. Участками серицит фрагментарно замещает центральные, либо периферийные части зерен хлорита. *Хлорит*, относящийся к ряду клинохлор-пеннин, развит в околорудных породах лежащего бока месторождений, в то время как серицит развит практически повсеместно (Бестемьянова, 2017). Хлорит был использован как природный геотермометр (Caritat и др., 1993), расчет температуры проводился по  $Al^{IV}_{cor}$ , согласно методике McDowell, Elders (McDowell, Elders, 1980). Температура его образования составила 210 – 255 °С. Рудные минералы, в изученных породах, представлены пиритом, сфалеритом, халькопиритом и галенитом.

Пирит I, представлен идиоморфными зернами, кубического и пентагондодекаэдрического габитуса, также отмечаются зерна, представленные комбинацией куба и октаэдра (Бестемьянова, 2017). Обособления пирита I зачастую катаклазированы, фрагменты зерен часто разобщены, корродированы, более поздними по времени выделения сульфидами, участками отмечаются признаки перекристаллизации (рисунок 1 а).

Руды представлены: основные минералы – пирит, сфалерит, халькопирит, галенит; второстепенные – тетраэдрит; редкие – борнит, халькозин, теннантит, арсенопирит, электрум, аргентит, самородное серебро, самородный теллур, гессит, галеновисмутит, амальгамы золота и серебра. Жильные минералы, представлены баритом, который может выполнять от 10 до 80 % объема рудных тел, кварцем, и в меньшей, степени карбонатами – кальцитом и доломитом.

**Галенит-халькопирит-сфалеритовая парагенетическая ассоциация.** Характерные текстуры: массивная, вкрапленная, прожилковая, реже брекчиевая; структуры: мелко-, среднезернистая, идиоморфно- и аллотриоморфнозернистая, эмульсионная, дробления, коррозионная, смятия, замещения, колломорфная, редко петельчатая.

*Сфалерит*, в виде сплошных зернистых масс, или отдельных преимущественно аллотриоморфных, реже гипидиоморфных зерен, с хорошо проявленной спайностью. По совокупности данных, а именно по структурным характеристикам и с учетом данных химического состава, обособления сфалерита представляют собой прерывистую генерацию с двумя зарождениями в пределах одного парагенезиса (здесь и далее обозначаются как сфалерит Ia и Ib).

На постоянной основе в сфалерите Ia отмечается эмульсионная вкрапленность халькопирита (рисунок 1 в). В качестве изоморфной примеси в сфалерите Ia присутствует Fe до 3.8 масс. % и Cd до 2.3 масс. %.

Сфалерит Ib полностью освобожден от эмульсионной вкрапленности халькопирита, представлен аллотриоморфными зернами и тонкозернистыми обособлениями в ассоциации с халькопиритом I, пиритом I и сфалеритом Ia, в качестве изоморфной примеси в сфалерите Ib присутствует Fe до 0.3 масс. % и Cd до 1.2 масс. %.

*Халькопирит I* выполняет пространство между ранее выделившимися зернами и агрегатами пирита I, зачастую цементируя его раздробленные фрагменты (рисунок 1 б, г). На

всех трех изученных месторождений выполняет прожилки, линзочки, между агрегатов сфалерита Ia и пирита I (рисунок 1 а, б, д). На Стрижковском месторождении халькопирит также слагает мономинеральные гнездовые агрегаты в существенно свинцовом типе руд (до 75 % галенита), а также совершенно незначительные по распространению вкрапленные медные руды, в подстилающей раннедевонские рудовмещающие отложения, палеозойской зеленосланцевой толще (корбалихинская свита PZ<sub>1kr</sub>). Халькопирит I довольно часто корродирован и замещен тетраэдритом и галенитом.

На Зареченском месторождении участками в ассоциации с пиритом I и халькопиритом I, отмечается *хлорит II*. Зерна зональные, ядерная часть согласно химическому составу железистая и относится к *пикнохлориту*, периферийная – магнезиальная и относится к *пеннину*. Расчетная температура образования по  $Al^{IV}cor$  (по методике McDowell, Elders, 1980) – составляет 240 – 290°C.

*Галенит I* на все трех месторождений выполняет прожилки, гнезда и обособления неправильной формы, корродирует ранее выделившиеся сульфиды, в частности пирит I и II, сфалерит Ia и б, халькопирит I. На Стрижковском месторождении выполняет массивные галенитовые руды средне-, реже крупнозернистой структуры, с гнездовыми обособлениями сфалерита I и халькопирита I. Довольно часто на всех изученных объектах в агрегатах галенита I отмечаются признаки пластической деформации, представленной искривленными треугольниками выкрашивания, распределяющимися вдоль направления спайности минерала (рисунок 1 г), что связано с проявлением синрудной тектоники. В галените данного парагенезиса отмечается примесь Se (на Стрижковском и Зареченском месторождениях), до 1.2 масс. %.

*Тетраэдрит* в составе парагенезиса встречается на всех изученных месторождениях. Образуется в основном тонко- и мелкозернистые агрегаты, реже отдельные зерна, прожилки и просечки в ранее выделившихся сульфидах. Корродирует периферийные части зерен халькопирита I. В составе тетраэдрита на всех изученных месторождениях довольно устойчиво отмечается примесь Ag до 5 – 12 масс. %. В рудах Змеиногорского месторождения исследователями фиксируется несколько членов группы блеклых руд, а именно тетраэдрит-(Cd), тетраэдрит-(Zn), а также тетраэдрит-(Hg) (Sejkora и др., 2023).

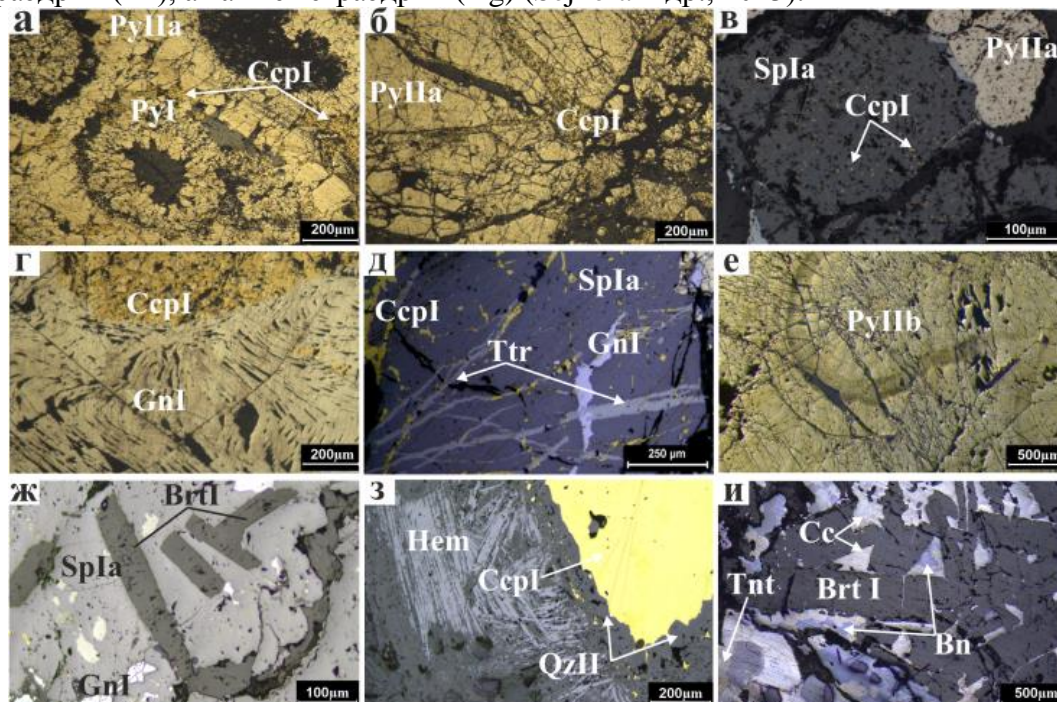


Рисунок 1. Основные микроструктурные характеристики парагенетических ассоциаций барит-полиметаллических месторождений Змеиногорского рудного района. Галенит-халькопирит-сфалеритовая парагенетическая ассоциация: а – частично перекристаллизованные в гранобластовый агрегат обособления пирита I; б – катаклазированные идиоморфные зерна пирита II, по трещинам

которого развивается халькопирит I; в – эмульсионная вкрапленность халькопирита I в сфалерите Ia; г – проявление структуры деформации в галените I; д – развитие более поздних по времени образования сульфидных минералов – галенита I и тетраэдрита, выполняющих секущее положение к ранее выделившимся сфалериту I и халькопириту I; е – концентрически-зональные агрегаты пирита II. Гематит-кальцит-баритовая парагенетическая ассоциация: ж – призматические идиоморфные зерна барита I, цементированные мелкозернистым агрегатом сфалерита I; з – игольчатые обособления гематита в ассоциации с халькопиритом I и кварцем II. Халькозин-теннантит-борнитовая парагенетическая ассоциация: и – столбчатые зерна барита I, и развивающийся в интерстициях халькозин-теннантит-борнитовый парагенезис. Снимки получены в поляризационном микроскопе при отраженном свете.

Примечание: Bп – борнит, Bрт – барит, Сс – халькозин; Ссп – халькопирит, Gп – галенит, Нем – гематит; Py – пирит, Sp – сфалерит, Tnt – теннантит, Ttr – тетраэдрит.

В рудах Зареченского месторождения в данной парагенетической ассоциации, фиксируются колломорфные обособления пирита II генерации, с четко проявленным зональным строением. Пирит II представляет собой фактически мономинеральные почки размером от 0.2 до 60 мм (рисунок 1 е), редко отмечаются сложные по строению и составу зональные агрегаты, состоящие из чередующихся зон пирита II, в межслоевом пространстве которых фиксируются обособления сфалерита Ib, галенита I, реже обособления тетраэдрита, а также кальцита I и барита II. Появление пирита такой формы свидетельствует об образовании его в условиях резкого пересыщения рудообразующих растворов, которое происходит при смешении горячего металлоносного флюида с относительно холодной морской водой и его быстрой кристаллизацией (Skarpelis, 2020).

В качестве редких минералов выявлены: *гессит, самородные теллур и висмут, галеновисмутит, гринокит*. Обособления этих минеральных видов незначительны по размерам, корродируют ранее выделившиеся сфалерит, халькопирит I, галенит I и тетраэдрит (приложение Б, рисунок 2 а–в).

Помимо сульфидных и редких минералов в данной ассоциации широко распространен *кварц II*, в виде идиоморфных зерен и гранобластового агрегата, а также *барит I* в виде призматических и столбчатых зерен (рисунок 1 ж, з).

**Гематит-кальцит-баритовая парагенетическая ассоциация.** Характерные текстуры массивная, прожилковая, гнездовая. Структуры – неравномернозернистая, от мелко-, до крупнозернистой, идиоморфно- и гипидиоморфнозернистая, коррозионная, замещения. Минералы данной ассоциации формируют жилы, прожилки, гнезда, а также в виде мелко-, среднезернистых агрегатов цементируют ранее образованные сульфиды, отмечающиеся в виде брекчированных обломков.

*Барит II* составляет 15 – 80 % рудных тел (Зареченское месторождение). Образует сплошные от мелко- до крупнозернистых агрегаты, цементирующие ранее образованный галенит-халькопирит-сфалеритовый парагенезис, участками отмечается в виде шлировых обособлений и гнезд. На всех трех изученных месторождениях образует мономинеральные баритовые руды, локализующиеся в верхних частях разрезов. В качестве примесных элементов в составе барита II отмечается Co (0.1 – 0.2 масс. %) и Sr (0.2 – 1.3 масс. %).

*Кальцит I* образует прожилки, секущие ранее выделившиеся сульфиды, участками находится в тесной ассоциации с кварцем II и баритом II. В составе отмечается примесь Mn 0.35 – 0.7 масс. %.

*Гематит* отмечается в виде игольчатых зерен (рисунок 1 з), либо образует прожилки, сложенные тонкозернистыми агрегатами, между кварцем II и ранее кристаллизовавшимися сульфидами, а также находится в тесной ассоциации с баритом II, придавая последнему розоватую окраску.

**Халькозин-теннантит-борнитовая парагенетическая ассоциация.** Данный парагенезис проявлен на Зареченском и Змеиногорском месторождениях. Минералы ассоциации выполняют прожилки, линзочки, гнезда, просечки и накладываются на ранее сформированные барит-полиметаллические руды. Распределяются в межзерновом пространстве

ранее выделившихся минералов, в частности барита I, сфалерита I, халькопирита I, тетраэдрита (рисунок 1 и), корродируя их.

*Борнит* представлен зернистыми агрегатами, часто в тесной ассоциации с теннантитом. Реже встречаются каемки и изометричные обособления вокруг ранее образованных тетраэдрита и халькопирита I. Участками в виде просечек содержит тонкие включения халькопирита II. В борните фиксируется постоянная примесь Ag до 5 масс. %.

*Теннантит* в виде самостоятельных гипидиоморфных зерен, или сплошных тонко- и мелкозернистых масс, имеет четкие границы с борнитом, халькозином и халькопиритом II. Характерно содержание примеси Ag до 4 масс. %.

*Халькозин* образует тонкозернистые массы или самостоятельные гипидиоморфные зерна, в тесной ассоциации с борнитом и теннантитом. В халькозине фиксируется примесь Ag 0.6 – 3.8 масс. %, участками по зернам халькозина развивается ковеллин.

В парагенезисе с вышеобозначенными сульфидами отмечаются халькопирит II, галенит II, характеризующиеся примесью Ag 1.8 – 2.2 масс. %, а также сложные по составу амальгамы золота и серебра, амальгамы серебра (шахнерит, евгенит), самородное серебро и золото, штрмейерит, ялпаит, балканит, маккинстриит. Эти минералы обособляются в виде прожилков, просечек, линзочек, агрегатов неправильной формы, и, как правило, корродируют ранее выделившиеся халькозин, халькопирит II, борнит, теннантит (приложение Б, рисунок 2 г–и).

**Карбонат-гипсовая парагенетическая ассоциация.** Характеризуется незначительным распространением. Кальцит II генерации, доломит, гипс в виде тонко-, мелкозернистых обособлений, выполняющих секущее положение по отношению к ранее выделившимся парагенезисам, участками в виде мономинеральных прожилков, участками накладываются в виде полиминеральных гнезд в ассоциации с гипидиоморфными зернами флюорита.

### **Второе защищаемое положение.**

*По полученным данным  $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$  датирования серицита околорудных метасоматитов, а также изотопному составу серы сульфидов ( $\delta^{34}\text{S}$ ), формирование изученных барит-полиметаллических месторождений связано с пульсационным поступлением гидротермальных растворов, функционирующих с начала эмского времени ( $408 - 402 \pm 4.1$  млн. лет), и имеющих смешанный источник вещества – мантийный ( $0 \pm 2$  ‰) и коровый ( $-4.6 - -3.6$  ‰). Наложенный халькозин-теннантит-борнитовый парагенезис характеризуется облегченными значениями серы ( $-8.9 - -13.6$  ‰).*

Геохронологические ( $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ ) исследования проведены на 9 образцах серицита, из которых 6 проб околорудных хлорит-серицит-кварцевых метасоматитов (Зареченского и Стрижковского месторождений), 2 образца серицита из подстилающих метаморфических пород, один из рудовмещающих девонских пород (Змеиногорское месторождение).

Полученные для изученных месторождений датировки можно разделить на 4 геологических этапа (рисунок 2). Первый этап  $436.3 \pm 5.3 - 421.0 \pm 5.0$  млн. лет от раннего до позднего силура соответствует времени метаморфизма подстилающей девонские отложения корбалихинской толщи (PZ<sub>1kr</sub>).

Второй этап –  $408.7 - 402.8 \pm 3.3$  млн. лет соответствует пражскому и эмскому векам раннего девона, и связан с началом активной гидротермальной деятельности в пределах Змеиногорско-Зареченского рудного поля, и началу формирования хлорит-серицит-кварцевых околорудных метасоматитов. В этот период северо-западная часть Рудного Алтая испытывала мощные тектонические преобразования на ряду со сменяющимися друг друга обстановками трансгрессии и регрессии, сжатия и растяжения, характеризовалась проявлением раннедевонского магматизма, выраженного во внедрении в слаболитифицированные породы раннего девона субвулканических пород (мельнично-сосновского комплекса ( $\lambda\text{D}_{1-2ms}$ )), а также развитием интрузивных пород алейского комплекса (по геологическим данным D<sub>1</sub> (Куйбида,

2009)); по результатам U-Pb датирования  $379 \pm 7$  млн. лет (Владимиров и др., 2001);  $402 \pm 10$  млн. лет (Семиряков и др., 2023).

Третий этап –  $393.4 \pm 3.2 - 386.6 \pm 3.0$  млн. лет отвечает активным тектоническим подвижкам, вызывающим подновление и активизацию рудоподводящей системы, и, вероятно, появление свежих порций флюидных растворов. В этот же период в пределах Алейского антиклинория происходит внедрение змеиногорского габбро-плагиогранит-лейкогранитового комплекса 384 – 395 млн. лет, (Куйбида и др., 2012); 384 – 371 млн. лет, (Семиряков и др., 2024).

Четвёртый этап –  $331.1 \pm 4.0$  млн. лет коррелирует с возрастом формирования на изученной территории гилевского плагиогранитного интрузивного комплекса (327 – 313 млн. лет), внедрение которого произошло на пике герцинских коллизионных событий, обусловленных взаимодействием Казахстанского и Сибирского палеоконтинентов (Куйбида и др., 2013), что обусловило проявление локальных преобразований раннедевонских рудовмещающих пород.

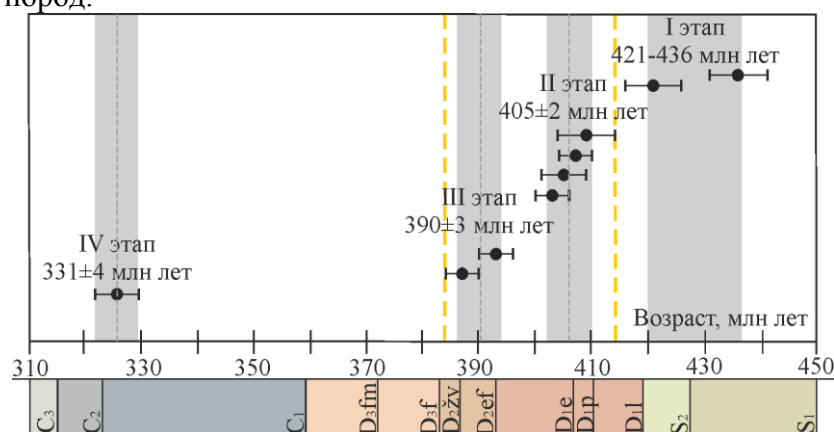


Рисунок 2. Сводные результаты  $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$  датирования серицита барит-полиметаллических месторождений Змеиногорского рудного района: II и III этапы – начало функционирования и подновления гидротермальных систем.

Изотопный состав серы сульфидных минералов гидротермальных месторождений зависит от источника серы гидротермальных растворов и физико-химических условий кристаллизации сульфидных минералов (Seal, 2006). Поэтому для исследуемых объектов, исходя из выделенных парагенетических ассоциаций, были получены значения  $\delta^{34}\text{S}$  с целью определения потенциального источника вещества. Пирит I характеризуется значениями от -1.8 до 2.7‰ (среднее 0‰). Сульфиды из галенит-халькопирит-сфалеритового парагенезиса: сфалерит Ia -1.2 до -3‰ (-2.0‰), сфалерит Ib 3.9 до 6.4‰ (5.1‰), халькопирит I от 0 до -4.6‰ (-2.2‰), галенит I +1.3 до -4.4‰ (-3.9‰). Сульфиды халькозин-теннантит-борнитового парагенезиса – борнит и теннантит от -8.9‰ до -13.6‰. Схематическое изображение изменения значений  $\delta^{34}\text{S}$  относительно выделенных парагенезисов представлено на рисунке 3.

Сульфиды, со значением  $\delta^{34}\text{S}$  0 до  $\pm 3$ ‰, как правило, характеризуются ее мантийным источником (Seal, 2006). К таковым на изученных объектах можно отнести пирит I, сфалерит Ia, халькопирит I. Тетраэдрит и галенит I из галенит-халькопирит-сфалеритового парагенезиса характеризуются несколько облегченными значениями  $\delta^{34}\text{S}$  (-3.7 – -4.4‰), что указывает на коровую природу серы. Утяжеление  $\delta^{34}\text{S}$  отмечающееся в сфалерите Ib (+6.4‰) может свидетельствовать о вовлечении в процесс рудогенеза серы из вмещающих вулканогенно-осадочных пород.

Самые облегченные значения  $\delta^{34}\text{S}$  борнита и теннантита по отношению к ранее выделившимся тетраэдриту, галениту I, сфалериту I, можно объяснить заимствованием серы из ранее образованных сульфидов и частичным ее окислением, происходящем при смене потенциала минералообразующего флюида. В результате чего происходит разделение изотопов



между окисленными и восстановленными формами, при этом восстановительные формы обогащаются легким изотопом  $S^{32}$  (Гриненко, 1974).

Исследование изотопных характеристик углерода и кислорода было проведено для кальцита из кварц-карбонатных жил, секущих метаморфизованные отложения корбалихинской свиты, для кальцита из гематит-кальцит-баритового парагенезиса, и для самого позднего кальцита, секущего ранее выделившиеся парагенезисы (карбонат-гипсовый парагенезис). В результате, кальцит жил корбалихинской свиты фиксирует значения  $\delta^{13}C$  -1.8 – -1.6‰,  $\delta^{18}O$  – 9.4‰. Кальцит I из гематит-кальцит-баритового парагенезиса характеризуется более облегченными значениями, варьирующими  $\delta^{13}C$  -13.3 – -17.4‰,  $\delta^{18}O$  16.6 – 19.3‰. Самый поздний кальцит II, из карбонат-гипсового парагенезиса  $\delta^{13}C$  1.1 ‰,  $\delta^{18}O$  -1.1‰. Расчетные значения  $\delta^{13}CO_2$  флюида составляют: для кальцита жил -4.5 – -4.7‰, кальцита I гематит-кальцит-баритового парагенезиса -15.2 – -19.3‰, кальцита II -1.8‰.

Расчетные величины  $\delta^{18}H_2O$  флюида: для кальцита жил -4.5‰, для кальцита I гематит-кальцит-баритового парагенезиса 0.8 – 3.5‰, для кальцита II карбонат-гипсового парагенезиса 0.9–1.1‰ (рисунок 3 б).

По изотопным данным в формировании кальцита жил участвовал углерод, поступивший во флюид из глубинного корового источника, кальцита I гематит-кальцит-баритового парагенезиса – из биогенных соединений вмещающих пород (алевролитов и аргиллитов), карбонат-гипсового парагенезиса – предполагает его заимствование из вмещающих морских известняков. Полученные изотопные данные кислорода флюида для кальцита всех трех ассоциаций указывают на его смешение с метеорной водой.

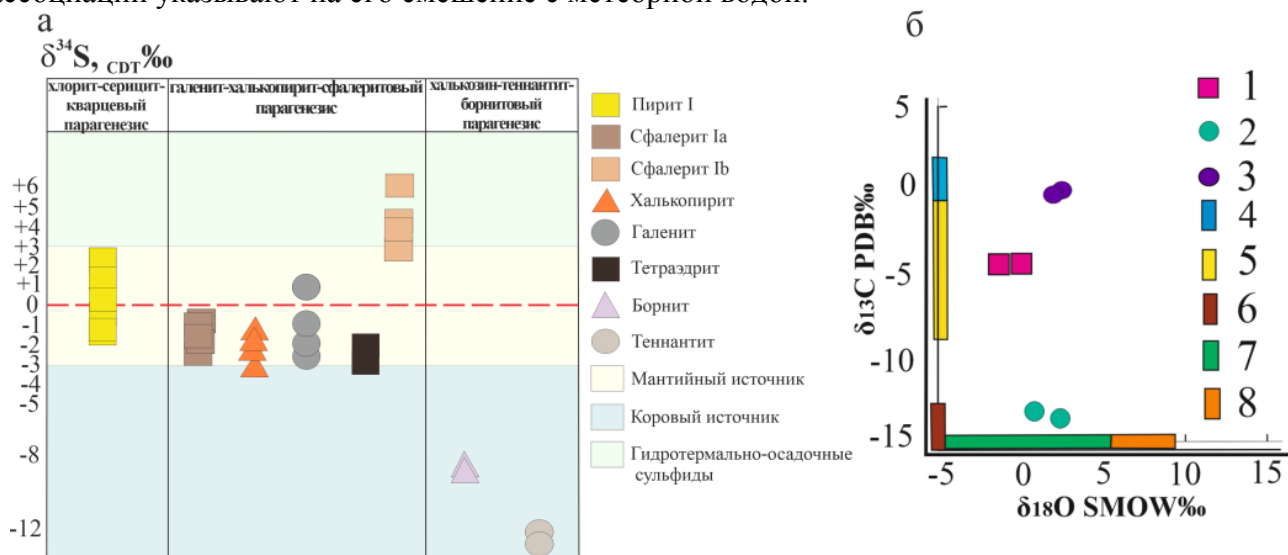


Рисунок 3. Характеристика изотопного состава серы сульфидов, углерода и кислорода кальцита руд барит-полиметаллических месторождений Змеиногорского рудного района: а – вариации изотопных значений серы сульфидных минералов относительно выделенных парагенетических ассоциаций; б – вариации значений углерода и кислорода флюида по изотопным данным кальцита (1 – кальцит кварц-карбонатных жил ( $Pz_1kr$ ); 2 – кальцит гематит-кальцит-баритового парагенезиса; 3 – кальцит карбонат-гипсового парагенезиса; 4 – углерод морских известняков; 5 – углерод магматического или глубинного корового флюида; 6 – биогенный углерод; 7 – кислород метеорных вод; 8 – кислород магматической воды; (1 – 3 авторские, 4 – 8 по данным: Галимов, 1968; Omoto, 1997; Hoefs, 2009).

### Третье защищаемое положение.

Минеральные ассоциации барит-полиметаллических месторождений Змеиногорского рудного района формировались гидротермальными растворами, насыщенными углекислотой и серосодержащими соединениями, в условиях постепенного снижения температуры от 270 до 90 °C, на фоне увеличения солёности (от 1.5 до 9.5 масс. % NaCl экв).

Параметры гидротермального рудообразования оценены по результатам изучения флюидных включений в кварце, кальците, сфалерите, и барите методами термоксиометрии,

рамановской спектроскопии, а также беспиролизной газовой хромато-масс-спектрометрии (GC-MS). Плотность водно-солевых включений рассчитывалась исходя из температуры общей гомогенизации и солёности, давление с учетом температуры плавления льда и температуры гомогенизации (Steele-MacInnis et al., 2012).

Результаты термо- и криометрических исследований индивидуальных флюидных включений приведены в приложении В, таблица 1.

В кварце околорудноизмененных пород (кварц I, хлорит-серицит-кварцевый парагенезис) отмечаются первичные двухфазные (Ж+Г) включения (рисунок 4 а) с температурой гомогенизации в жидкую фазу 230 – 270 °С. Реже встречаются однофазные (вторичные) существенно водные включения. Растворы, законсервированные во включениях, имеют солёность 1.5 – 5.1 масс. % NaCl экв., содержат CO<sub>2</sub>, SO<sub>2</sub>, HSO<sub>4</sub>, H<sub>2</sub>O (liquid). Температура эвтектики варьирует -26 до -36 °С, растворы характеризовались хлоридным магниев-калийным составом. Плотность растворов составляла 0.8 – 0.9 г/см<sup>3</sup>, давление в минералообразующей среде 0.15 – 0.53 кбар.

Сфалерит Ia (галенит-халькопирит-сфалеритовый парагенезис) характеризуется трехфазными включениями (Ж+Г+Т). Твердая фаза по данным рамановской спектроскопии представлена тетраэдрическими кристалликами халькопирита (рисунок 4 б). Температура гомогенизации и концентрация солей соответствуют 190 – 230 °С и 1.9 – 3.9 масс. % NaCl экв. Во включениях сфалерита Ia содержатся H<sub>2</sub>, CO<sub>2</sub>, H<sub>2</sub>O (liquid). Плотность минералообразующего флюида составляла 0.85 – 0.91 г/см<sup>3</sup>, давление в минералообразующей среде 0.22 – 0.28 кбар.

В сфалерите Ib содержатся преимущественно двухфазные (Ж+Г) (рисунок 4 в), в меньшей степени существенно водные включения. Температура гомогенизации и концентрация солей характеризуется значениями 150 – 180 °С и 1.5 – 3.5 масс. % экв. NaCl, давление в минералообразующей среде составляло 0.07 – 0.11 кбар. Во включениях сфалерита Ib содержатся CO<sub>2</sub>, COS, CH<sub>4</sub>, H<sub>2</sub>O (liquid).

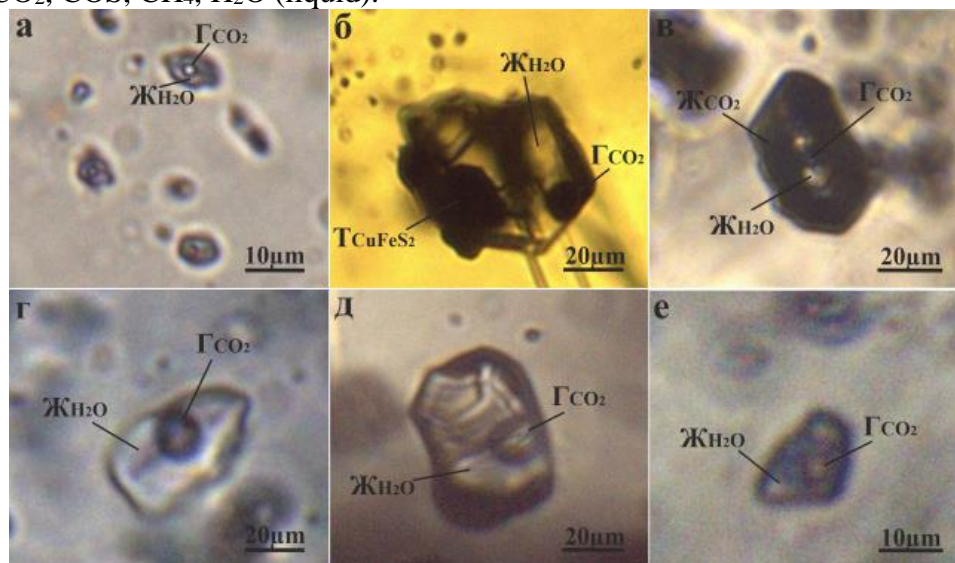


Рисунок 4. Флюидные включения в кварце I и II генераций, сфалерите Ia и Ib, барите II и кальците I Змеиногорского, Зареченского и Стрижковского месторождений: а – группа двухфазных (Ж+Г) включений в кварце I околорудных метасоматитов (хлорит-серицит-кварцевый парагенезис); б – трёхфазное (Ж+ Г+Т) включение в сфалерите Ia (галенит-халькопирит-сфалеритовый парагенезис); в – двухфазное (Ж+Г) включение в сфалерите Ib (галенит-халькопирит-сфалеритовый парагенезис); г – двухфазное (Ж+Г) включение в кварце II генерации (галенит-халькопирит-сфалеритовый парагенезис); д – двухфазное (Ж+Г) включение в барите II; е – двухфазное (Ж+Г) включение в кальците I (барит II и кальцит I из барит-кальцит-гематитового парагенезиса). Снимки получены в поляризационном микроскопе, при проходящем свете и параллельных николях.

В кварце II (галенит-халькопирит-сфалеритовый парагенезис) (рисунок 4 г), отмечаются двухфазные включения (Ж+Г), гомогенизирующиеся при температуре 170 – 190 °С, с солёностью 1.6 – 4.0 масс. % NaCl экв. Включения характеризуются наличием CO<sub>2</sub>, SO<sub>4</sub>, CO<sub>3</sub><sup>2-</sup>,

$\text{NH}_3$ ,  $\text{H}_2\text{O}$  (vapor). Плотность растворов составляла  $0.9 - 0.92 \text{ г/см}^3$ , давление в минералообразующей среде  $0.07 - 0.13 \text{ кбар}$ .

По данным температуры эвтектики ( $-25$  до  $-43^\circ\text{C}$ ), сфалерит I и кварц II кристаллизовались из хлоридно-железистого флюида плотностью  $0.8 - 0.92 \text{ г/см}^3$ .

Включения в барите II (гематит-кальцит-баритовый парагенезис) преимущественно двухфазные (Ж+Г), однако встречаются и однофазные, водные или существенно газовые. Температура гомогенизации характеризуется значениями от  $160$  до  $240^\circ\text{C}$ , солёность  $6.1 - 9.5$  масс. %  $\text{NaCl}$  экв. Во включениях фиксируются  $\text{SO}$ ,  $\text{SO}_4^{2-}$ ,  $\text{H}_2\text{O}$  (liquid). Плотность раствора составляла  $0.91 - 0.96 \text{ г/см}^3$ , давление в минералообразующей среде  $0.06 - 0.20 \text{ кбар}$ .

Кальцит I (гематит-кальцит-баритовый парагенезис) характеризуется двухфазными включениями (Ж+Г), которые гомогенизируются при температуре от  $90$  до  $130^\circ\text{C}$ , солёность минералообразующего флюида варьирует  $3.1 - 5.5$  масс. %  $\text{NaCl}$  экв., плотность  $0.96 - 0.98 \text{ г/см}^3$ , давление в минералообразующей среде составляло  $0.01 - 0.03 \text{ кбар}$ . Данные по температуре эвтектики барита II и кальцита I (от  $-27$  до  $-34^\circ\text{C}$ ) свидетельствуют о хлоридном магний-натриевом составе растворов.

Зависимость температуры гомогенизации изученных минералов от солёности растворов имеет волнообразный характер и показана на графике (рисунок 5).

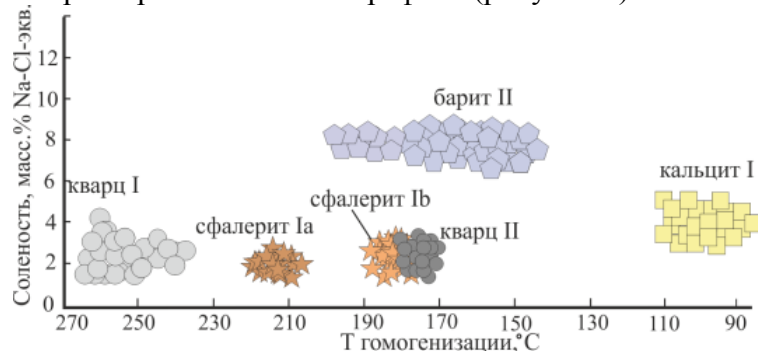


Рисунок 5. Результаты термокриометрических исследований флюидных включений в минералах барит-полиметаллических руд Змеиногорского, Зареченского и Стрижковского месторождений: 1 – кварц I из хлорит-серицит-кварцевого парагенезиса; 2 – 4 сфалерит I а, b и кварц II из галенит-халькопирит-сфалеритового парагенезиса; 5 – барит II и кальцит I из гематит-кальцит-баритового парагенезиса.

Возрастающую солёность на фоне снижающейся температуры можно объяснить периодическим вскипанием растворов при изменяющемся давлении в минералообразующей системе (Рёддер, 1987).

По данным хромато-масс-спектрометрии (GC-MS) основными компонентами газовой фазы включений являются водяной пар и углекислота (рисунок 6). Так, на протяжении всего процесса рудогенеза доля воды (водяного пара) занимает доминирующую роль и составляет от  $69.21$  (кварц I околорудных метасоматитов – хлорит-серицит-кварцевый парагенезис) до  $64.29$  отн. % (кальцит I из гематит-кальцит-баритового парагенезиса), при этом максимальные содержания свойственны сфалериту Ib –  $79.46$  отн. % и кварцу II –  $74.46$  отн. %, минимальные содержания отмечаются в галените I –  $27.20$  отн. % (галенит-халькопирит-сфалеритовый парагенезис). Доля водяного пара в сульфидах халькозин-теннантит-борнитового парагенезиса не превышает  $75.33$  отн. %. Вторым, значимым по содержанию, компонентом является углекислота. В кварце I околорудных метасоматитов и сфалерите Ia значение углекислоты фиксируется от  $7.95$  до  $7.32$  отн. %, в сульфидах галенит-халькопирит-сфалеритового парагенезиса ее доля возрастает до  $35.68$  отн. %. В кальците I и барите II гематит-кальцит-баритового парагенезиса доля углекислоты снижается до  $19.84$  отн. % (барит II) и снова увеличивается до  $32.91$  отн. % (кальцит I). Содержание углекислоты имеет обратную зависимость от содержания  $\text{H}_2\text{O}$ .

Помимо водяного пара и углекислоты во флюидах выявлен широкий спектр бескислородных (алифатические – парафины и олефины), циклических (нафтенны и арены) и



кислородсодержащих (спирты, и эфиры, альдегиды, кетоны и карбоновые кислоты) углеводов, а также азот-, серо- и галогенсодержащих соединений.

В газовой фазе включений присутствуют и серосодержащие соединения, в частности  $\text{H}_2\text{S}$  и  $\text{SO}_2$ , содержания которых увеличиваются в галенит-халькопирит-сфалеритовом парагенезисе и достигает 29.4 отн. %.

В минералообразующей среде всех трех изученных месторождений, на постоянной основе фиксируется присутствие кислородсодержащих и алифатических, а в минералах хлорит-серицит-кварцевого и галенит-халькопирит-сфалеритового парагенезисов циклических углеводов. Увеличение роли кислородсодержащих углеводов характерно для кварца I хлорит-серицит-кварцевого, а также для сфалерита и галенита I галенит-халькопирит-сфалеритового парагенезисов (рисунок 6). Доминирующая роль алифатических углеводов отмечается для сульфидов халькозин-теннантит-борнитового парагенезиса. В частности, во включениях именно этого парагенезиса фиксируются содержания метана ( $\text{CH}_4$ ) до 7.4 отн. %.

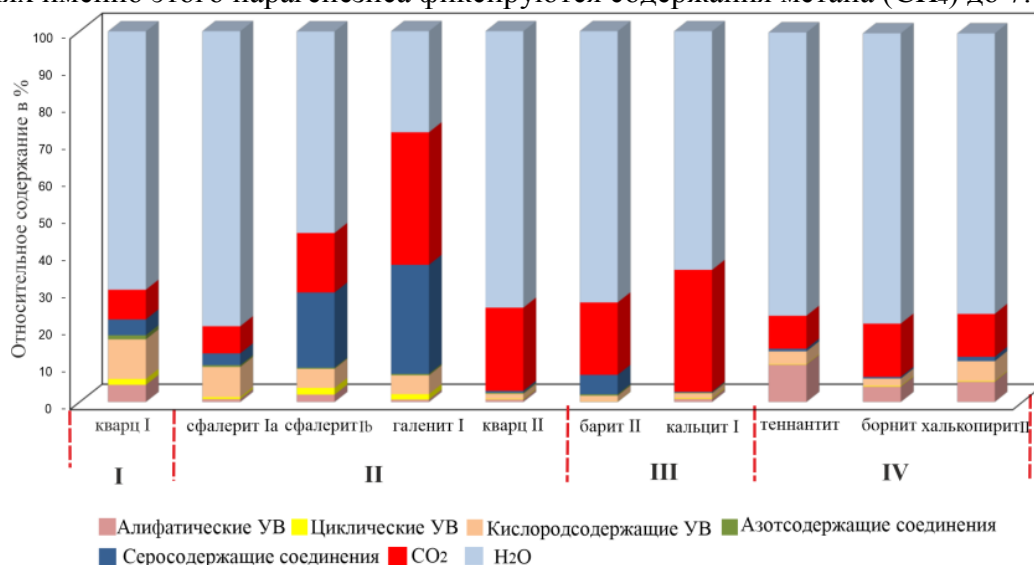


Рисунок 6. Относительное суммарное содержание углеводов (алифатических, циклических и кислородсодержащих), серо- и азотсодержащих соединений,  $\text{CO}_2$  и  $\text{H}_2\text{O}$  в минералах выделенных парагенезисов Змеиногорского, Зареченского и Стрижковского месторождений по данным газовой хроматографии (GC-MS): I – хлорит-серицит-кварцевый; II – галенит-халькопирит-сфалеритовый; III – гематит-кальцит-баритовый; IV – халькозин-теннантит-борнитовый.

Присутствие углеводородных соединений в гидротермальных системах связывают с их способностью образовывать сложные комплексные соединения (Новгородова, 1983; Буслаева, Новгородова, 1989), повышать растворимость и транспортировать металлы, прежде всего золото (Williams-Jones et. al., 2009; Migdisov et al., 2007, Crede et al., 2019).

В кварце I околорудных метасоматитов (хлорит-серицит-кварцевый парагенезис) фиксируется наличие азотсодержащих соединений (1.2 отн. %). Роль азотсодержащих соединений незначительна и, чаще всего, они способствуют растворению вмещающих пород и улучшению их проницаемости при циркуляции флюида (Прокофьев, 2018).

### Условия формирования барит-полиметаллических месторождений Змеиногорского рудного района

Совмещенный характер минеральных ассоциаций, текстурно-структурные особенности руд, их приуроченность к зонам пересечения крупных разломов, наличие вулканитов в структуре рудного района, площадное развитие околорудных метасоматитов, совмещенный характер развития парагенетических ассоциаций, широкое развитие структур дробления, замещения и переотложения позволяет характеризовать изученные руды как метасоматические вулканогенно-гидротермальные.

Согласно современным представлениям для девона АССО и Рудного Алтая установлена регрессивно-трансгрессивная цикличность и активное проявление вулканизма антидромной направленности, что определило особенности структурного положения месторождений трех субформаций региона (барит-полиметаллической, колчеданно-полиметаллической, медно-колчеданной). На фоне лохковско-пражского цикла регрессии и продолжительной трансгрессии, ранний девон характеризовался накоплением рудовмещающей вулканогенно-осадочной толщи мельничной свиты  $D_{1-2mn}$  и заложением крупной региональной структуры – Рудноалтайского мегапрогиба (РАМП).

В раннем девоне происходила тектоно-магматическая активизация, включавшая вулканизм, формирование субвулканических образований мельнично-сосновского комплекса, интрузий габбро-плагиогранитного алейского комплекса. Первая вспышка вулканизма на территории Змеиногорского рудного района датируется лохковским веком 412 млн. лет (Семиряков и др., 2023). Состав вулканитов, большинством исследователей, включая современный период (Мурзин, 2001; Туркин, 2008, Куйбида, 2013) характеризуется с явной доминантой продуктов кислого состава. Ареал его распространения затрагивал не только Змеиногорский рудный район, но и Лениногорский (Восточный Казахстан), где также локализовались крупные барит-полиметаллические месторождения (Зыряновское, Риддер-Сокольное, Тишинское, Ново-Лениногорское).

Проявлению рудного процесса (результатом которого стало образование барит-полиметаллических месторождений) предшествовала значительная гидротермальная проработка слаболитифицированных осадков пражских и эмских отложений нижнемельничной подсвиты. Происходило окварцевание аргиллитов, алевролитов, песчаников, туфов кислого состава, и образование микрокварцитов по алевролитам с первичной рассеянной сульфидной минерализации. Последующая мощная тектоническая деятельность второй половины раннего девона способствовала еще большему развитию систем крупных разломов и трещиноватости, которые послужили рудоподводящими каналами для новых порций металлоносных флюидов, циркуляция которых по полученным данным  $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$  датирования началась в конце пражского-начале эмского веков ( $408 - 402 \pm 4.1$  млн. лет) и возобновлялась в эйфельском ( $390 \pm 3$  млн. лет). Эта совокупность процессов привела к формированию барит-полиметаллической минерализации (рисунок 7).

Согласно геохимическим и изотопно-геохимическим исследованиям, магматические образования Змеиногорского рудного района обнаруживают плюмовую природу, осложненную мантийно-коровым взаимодействием (Семиряков и др., 2023; Семиряков, 2023). На одном из этапов эволюции подлитосферного магматического очага происходило отделение глубинного флюида, содержавшего ювенильную серу. По мере движения состав флюида эволюционировал, в том числе происходило дополнительное поступление серы из корового источника. О мантийно-коровом взаимодействии свидетельствует и изотопный состав свинца галенита, характеризующийся метками литосферной мантии (Чернышев и др., 2023) из месторождений Рудного Алтая, включая Зареченское и Змеиногорское. В то же время, по данным И.В. Гаськова отмечался вклад и корового источника свинца (Гаськов, 2002).

Флюид взаимодействовал с вулканогенно-осадочными породами нижней пачки раннего девона – алевролитами, известняками, туфопесчаниками, туфами, частично извлекая из них серу и углерод. В зоне разгрузки хлоридного магний-калиевого флюида вулканогенно-осадочные породы нижнемельничной подсвиты подверглись метасоматическим изменениям с формированием околорудных пород (хлорит-серицит-кварцевый парагенезис). Активизация тектонических подвижек способствовала появлению новых порций гидротермальных растворов хлоридно-железистого состава, характеризующихся металлоносной нагрузкой, что определило отложение основной массы сульфидных минералов (галенит-халькопирит-сфалеритовый парагенезис). Очередное возобновление тектонических процессов в пределах изучаемого района обусловило появление новых порций гидротермальных растворов хлоридно-магний-калиевого состава и отложение минералов гематит-кальцит-баритового парагенезиса.

Наличие значительного количества барита в рудах изученных месторождений связано с повышенными содержаниями бария, который коррелирует с кислой составляющей магматитов рудного района, а сера могла содержаться во флюиде в окисленной форме, а часть заимствоваться из осадочных пород и морской воды (Ворошилов, 2014).

Минеральные ассоциации хлорит-серицит-кварцевого, галенит-халькопирит-сфалеритового и гематит-кальцит-баритового парагенезисов формировались в зонах трещиноватости, межслоевого отрыва, скола. При этом наличие признаков дробления, зеркал скольжения, брекчирования в рудах указывает на значительную роль тектонического воздействия, как в син-, так и пострудный периоды. Активизация тектонических процессов в пострудный период, когда основная масса барит-полиметаллической минерализации уже была сформирована, непосредственное расположение вблизи крупного регионального разлома, а также контактирующее положение (по разлому) Зареченского и Змеиногорского месторождений со средне-позднедевонскими магматитами предопределили появление наложенных халькозин-теннантит-борнитового и карбонат-гипсового парагенезисов.

Учитывая слабую литификацию рудовмещающих пород, интенсивную тектоническую активность в пределах рудного района, можно предположить, что часть растворов проникала и откладывала рудное вещество на донной поверхности палеобассейна (в периоды трансгрессии). Этим объясняются находки незначительных по размерам (до 0.5 см) фрагментов сульфидных построек, обнаруженные на Зареченском месторождении и считающихся аналогами «черных курильщиков» (Кузнецова, 2023), а также руд, характеризующихся полосчатым строением. В среднедевонский регрессивно-трансгрессивный цикл в пределах Змеиногорского рудного района продолжалась магматическая деятельность, которая приобретала черты антидромной направленности (примерно равное соотношение кислой и основной составляющей). В этот период происходило внедрение среднедевонского (эйфельского) субвулканического давидовско-каменевского и интрузивного змеиногорского габбро-гранитного комплексов. Ареал их распространения носил более объемный и площадной характер и фиксировался не только в прибортовой, но в большей степени в осевой части Рудноалтайского мегапрогиба, развиваясь в юго-восточном направлении.

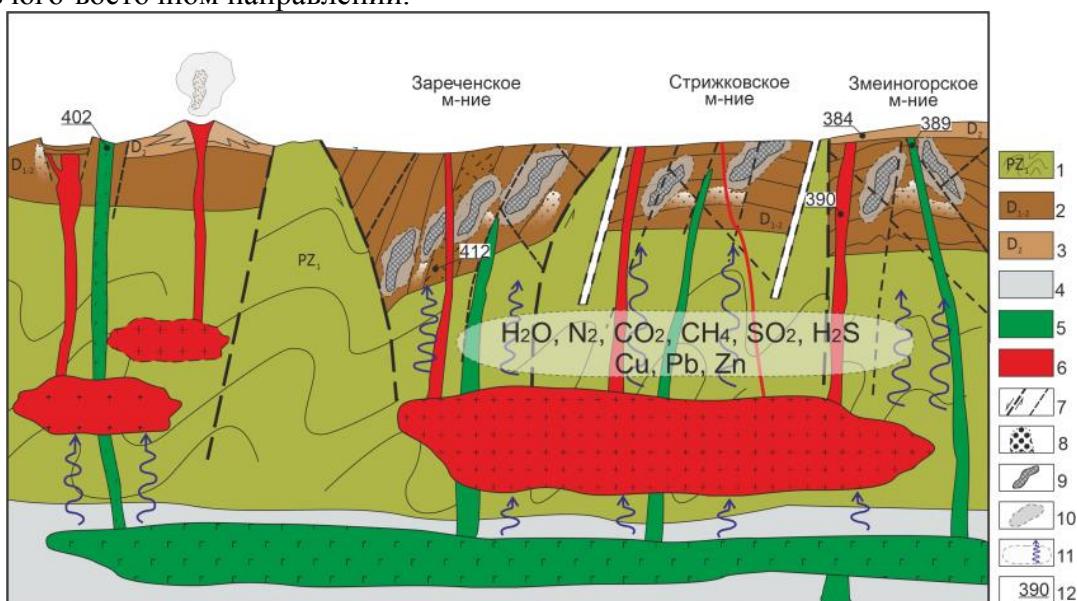


Рисунок 7. Обобщенная структурно-генетическая модель раннедевонского рудогенеза изученных месторождений 1-3 – стратиграфические образования: 1 – терригенно-метаморфогенные отложения ( $PZ_1$ ), 2 – вулканогенно-осадочные отложения мельничной свиты ( $D_{1-2mn}$ ), 3 – вулканогенные отложения сосновской свиты ( $D_{2ss}$ ); 4 – верхняя мантия; 5 – глубинный магматический очаг базитового состава и его производные; 6 – верхнекоровые промежуточные магматические камеры кислого состава; 7 – разрывные нарушения (главные и второстепенные); 8 – микрокварциты; 9 – рудные тела барит-полиметаллического состава; 10 – ореол околорудного метасоматического изменения; 11 – направление воздействия гидротермально-рудоносных флюидов; 12 – U-Pb датировки по циркону (Семиряков, 2023).

С этими магматическими комплексами могли быть связаны новые порции флюидов, которые мигрировали по зонам интенсивной трещиноватости и оказывали воздействие на сформированное барит-полиметаллическое оруденение. Возобновленная гидротермальная деятельность способствовала растворению, переотложению сульфидной минерализации и, в некоторой степени, ее обогащению с формированием халькозин-теннантит-борнитового парагенезиса.

В посткаменноугольный период вся территория Рудного Алтая испытала общее поднятие, что отразилось в прекращении осадконакопления и денудации рельефа с различным уровнем эрозионного среза в пределах Алейского поднятия и Змеиногорско-Быструшинского прогиба. Этот процесс, в частности, затронул и тектонические блоки, с локализованными в них барит-полиметаллическими месторождениями с выведением на палеоповерхность интрузивных массивов, вулканогенно-осадочных толщ девона и некоторых рудных тел (Змеиногорское и Стрижковское месторождения), что обусловило формирование зоны гипергенеза, с соответствующим преобразованием руд.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В результате проведенной работы получены новые данные о минералого-геохимических и генетических особенностях формирования руд барит-полиметаллических месторождений Змеиногорского рудного района – Змеиногорского, Зареченского, Стрижковского. Проведено изучение минерального состава руд, установлены минералы, ранее не диагностированные в рудах, выделены типоморфные особенности минеральных ассоциаций, уточнена последовательность рудообразования на месторождениях. На основе современных термобарогеохимических методов исследования флюидных включений в кварце, сфалерите, барите, кальците, обоснованы физико-химические параметры и флюидный режим формирования месторождений.

На месторождениях выделены парагенезисы, соответствующие последовательным стадиям формирования барит-полиметаллических руд. Наиболее ранняя ассоциация представлена хлорит-серицит-кварцевым парагенезисом и соответствует околорудным метасоматитам. При дальнейшем развитии и подновлении гидротермальной системы происходило формирование галенит-халькопирит-сфалеритового парагенезиса. Минералы гематит-кальцит-баритового парагенезиса завершали формирование основной массы барит-полиметаллических руд изученных месторождений.

Особенностью процесса рудогенеза на Змеиногорском и Зареченском месторождениях является наложенный на сформированные барит-полиметаллические руды более поздний халькозин-теннантит-борнитовый парагенезис с сопутствующей золото-серебряной минерализацией, который в свою очередь сменился карбонат-гипсовым парагенезисом.

Впервые выполнено  $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$  датирование околорудных пород барит-полиметаллических месторождений Змеиногорского рудного района, начало их формирования соответствует концу пражского, началу эмского ( $408 - 402 \pm 4.1$  млн. лет) и эйфельскому ( $390 \pm 3$  млн. лет) векам раннего-среднего девона.

Изотопные исследования сульфидных минералов, выделенных парагенезисов позволяют сделать вывод о смешанном (полигенном) источнике поступления серы. Сульфидам галенит-халькопирит-сфалеритового парагенезиса, также, как и пириту из хлорит-серицит-кварцевого парагенезиса свойственны отметки, соответствующие интервалу как мантийных значений ( $-3$  до  $3\%$ ), так и характеризующихся коровым источником (до  $-5\%$ ), с частичным извлечением серы из вмещающих осадочных пород (до  $6.4\%$ ). Сульфиды халькозин-теннантит-борнитового парагенезиса характеризуются самыми облегченными значениями  $\delta^{34}\text{S}$  ( $-8.9 - -13.6\%$ ), что может быть связано с заимствованием серы из ранее образовавшихся сульфидов и ее переотложением. Изотопные метки кислорода флюидов, из которых кристаллизовался кальцит (гематит-кальцит-баритового и карбонат-гипсового парагенезисов), указывают на их смешение

с метеорными водами, в то время как углерод заимствовался из вмещающих известняков, аргиллитов и алевролитов.

Прослежена эволюция температурного режима рудообразующих растворов (от 270 до 90°C), которая характеризуется волнообразным понижением и повышением температур в пределах основных парагенезисов, что может быть связано с поступлением новых порций флюида. Зафиксировано изменение солёности рудообразующих растворов, в сторону ее увеличения при отложении гематит-кальцит-баритового парагенезиса (1.5 – 9.5 масс. % NaCl экв.). Состав рудных растворов также претерпевал изменения. Хлорит-серицит-кварцевый парагенезис отлагался из хлоридного магний-калиевого флюида, галенит-халькопирит-сфалеритовый парагенезис из флюида хлоридно-железистого состава, гематит-кальцит-баритовый парагенезис из флюида с хлоридным магний-натриевым составом. Значительный объем в составе рудообразующей флюидной системы занимала вода (в том числе водяной пар) и углекислота, на постоянной основе присутствует широкий спектр углеводородов (кислородсодержащих, алифатических, циклических), серо- и азотсодержащие соединения.

Изученные объекты имеют связь с вулканизмом кислого состава и контролируются глубинными тектоническими структурами.

Обобщение опубликованного материала и полученных изотопно-геохимических данных позволило сформировать авторское представление о модели формирования барит-полиметаллических месторождений в пределах Змеиногорского рудного района.

## СПИСОК ОПУБЛИКОВАННЫХ РАБОТ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

*Статьи в журналах, включенных в Перечень рецензируемых научных изданий, в которых должны быть опубликованы основные научные результаты диссертаций на соискание ученой степени кандидата наук, на соискание ученой степени доктора наук:*

1. **Бестемьянова К.В.**, Гринев О.М. Околорудные метасоматиты барит-полиметаллических месторождений Змеиногорского рудного района (Рудный Алтай) // Известия Томского политехнического университета. Инжиниринг георесурсов. – 2017. – Т. 328. – № 9. – С. 114–126.
2. **Бестемьянова К.В.**, Гринев О.М. Минералогия барит-полиметаллических месторождений Змеиногорского рудного района (Рудный Алтай) // Известия Томского политехнического университета. Инжиниринг георесурсов. – 2021. – № 9. – Т. 332. – С. 210–222. – DOI: 10.18799/24131830/2021/9/3370
3. Гринев О.М., Семиряков А.С., **Бестемьянова К.В.**, Гринев Р.О. Морфоструктура и этапность формирования Змеиногорского барит-полиметаллического месторождения (Рудный Алтай) // Успехи современного естествознания. – 2022. – № 8. – С. 81–95. – DOI: 10.17513/use.37872.
4. Семиряков А.С., Гринев О.М., **Бестемьянова К.В.**, Гринев Р.О., Морозова Е.Н., Адылбаев Р.Р. Плюмовая природа и конвергентность геохимических признаков базитов эмсса-эйфеля северо-восточной части Рудного Алтая // Успехи современного естествознания. – 2023. – № 11. – С. 138–146. – DOI: 10.17513/use.38155.

*Статьи в сборниках материалов конференций, представленных в изданиях, входящих в Web of Science и/или Scopus:*

5. **Bestemianova K.V.**, Grinev O.M. Barite-polymetallic mineralization of Zmeinogorsk ore district and some genetic aspects of its formation // IOP Conference Series: Earth and Environmental Science. 2017. – Vol. 110. – P. 1–7. – DOI:10.1088/1755-1315/110/1/012003
6. **Bestemianova K.V.**, Grinev O.M. Zarechensk barite-polymetallic deposit and some conditions of its ore accumulation // International Multidisciplinary Scientific GeoConference Surveying Geology

and Mining Ecology Management. Abstract of the 18<sup>th</sup> International Conference. (Albena, Bulgaria 2–8 July, 2018) – 2018. – V. 18. – P. 635–641.

7. Semiryakov A.S., Grinev O.M., **Bestemianova K.V.**, Grinev R.O. Mineralogy and prospect of noble metals of gold-bearing ore breccias from ore fields of polymetallic deposits of Ore Altai // IOP Conference Series: Earth and Environmental Science. – 2019. – Vol. 319. – P. 1–9. URL: [iopscience.iop.org/article/10.1088/1755-1315/319/1/012018](https://iopscience.iop.org/article/10.1088/1755-1315/319/1/012018)

8. **Bestemianova K.V.**, Grinev O.M. Geological structure and conditions of formation of Strizhkovskoe barite-polymetallic deposit (Ore Altai) // IOP Conference Series: Earth and Environmental Science. – 2019. – Vol. 319. – P. 1–7. URL: [iopscience.iop.org/article/10.1088/1755-1315/319/1/012001](https://iopscience.iop.org/article/10.1088/1755-1315/319/1/012001)

9. Grinev O.M., Semiryakov A.S., **Bestemianova K.V.**, Grinev R.O. U-Pb geochronology of subvolcanic and pyroclastic formations of the Zmeinogorsk barite-polymetallic deposit (Rudny Altai) // IOP Conference Series: Earth and Environmental Science. – 2022. – Vol. 988. – 032078. – DOI:10.1088/1755-1315/988/3/032078.

*Публикации в прочих изданиях выборочно (сборниках материалов конференций, семинаров, школ):*

10. **Бестемьянова К.В.**, Гринев О.М. Новые данные по геологии и минералого-геохимическому составу барит-полиметаллических руд Змеиногорского месторождения (Рудный Алтай) // Третья Российская молодежная школа с международным участием «Новое в познании процессов рудообразования» (г. Москва, 02–06 декабря 2013 г.). – Москва: ИГЕМ, 2013. – С. 59–62.

11. **Бестемьянова К.В.** Сравнительный анализ состава рудных минералов барит-полиметаллических руд Змеиногорского и Стрижковского месторождений (Рудный Алтай) // Труды XVIII международного симпозиума имени академика М. Усова студентов и молодых ученых «Проблемы геологии и освоения недр» (г. Томск, 07–11 апреля 2014 г.). – Томск: НИ ТПУ, 2014. – С. 114–116.

12. Гринев О.М., **Бестемьянова К.В.** К вопросу о структурно-тектоническом контроле барит-полиметаллического оруденения Змеиногорского рудного района (Рудный Алтай) // Вопросы науки. – 2015. – Т. 2. – С. 13–17.

13. **Бестемьянова К.В.**, Гринев О.М. Минералого-геохимическая характеристика вкрапленных медных руд Западно-Стрижковского барит-полиметаллического месторождения (Рудный Алтай) // Вопросы естествознания. – 2015. – №3(7). – С. 13–16.

14. **Бестемьянова К.В.** Минералогия барит-полиметаллических месторождений Змеиногорского рудного района (Рудный Алтай) // Материалы XXI Всероссийской научной конференции «Уральская минералогическая школа-2015», посвященной 70-летию Победы в Великой Отечественной Войне (г. Екатеринбург, 1–3 октября 2015 г.). – Екатеринбург: Институт геологии и геохимии имени академика А.Н. Заварицкого, 2015. – С. 20–24.

15. **Бестемьянова К.В.** К вопросу о этапности и стадийности барит-полиметаллических руд Змеиногорского рудного района (Рудный Алтай) // Труды XX международного симпозиума имени академика М. Усова студентов и молодых ученых «Проблемы геологии и освоения недр» (г. Томск, 4–8 апреля 2016 г.). – Томск: НИ ТПУ, 2016. – С. 116–118.

16. **Бестемьянова К.В.**, Гринев О.М. Тектоника и стадийность рудообразования барит-полиметаллических месторождений Змеиногорского рудного района (Рудный Алтай) // Материалы третьей международной конференции «Корреляция алтаид и уралид: магматизм, метаморфизм, стратиграфия, геохронология, геодинамика и металлогения» (г. Новосибирск, 29 марта–01 апреля 2016 г.). – Новосибирск: ИГМ СО РАН, 2016. – С. 23–25.

17. **Bestemianova K.V.**, Grinev O.M. Steps and stages of ore mineralization of barite-polymetallic deposits at Zmeinogorsk ore district (Rudny Altai) // Materials of International school of earth science «Moscow International School of Earth Sciences» (Moscow, 23–28 may 2016 г.). – Moscow: Vernadsky Institute of Geochemistry and Analytical Chemistry RAS, 2016. – P. 16–17.



18. **Бестемьянова К.В.**, Гринев О.М. Барит-полиметаллическое оруденение Змеиногорского рудного и его генетические аспекты // VIII конференция с международным участием «Петрология магматических и метаморфических комплексов» (г. Томск, 29 ноября–2 декабря 2016 г.). – Томск: НИ ТГУ, 2016. – С. 23–31.
19. Гринев О.М., **Бестемьянова К.В.**, Гринев Р.О. Морфоструктуры и вещественный состав эмсс-раннеэйфельских вулканитов Змеиногорского рудного района (Рудный Алтай) // Материалы IX Всероссийской петрографической конференции с международным участием «Петрология магматических и метаморфических комплексов» (г. Томск, 28 ноября–2 декабря 2017 г.). – Томск: НИ ТГУ, 2017. – С. 118–127.
20. **Bestemianova K.V.**, Grinev O.M. Petro-geochemical characteristics of melnichnaya suite rocks (Zmeinogorsky ore area, Rudny Altai) // The 28<sup>th</sup> Goldschmidt conference proceeding of the conference. – 2018. <https://goldschmidtabstracts.info/2018/184.pdf>
21. Гринев О.М., Семиряков А.С., **Бестемьянова К.В.**, Гринев Р.О. К проблеме оруденелых брекчий и золотоносных кварцитов в рудных полях полиметаллических месторождений Рудного Алтая // Материалы X Всероссийской петрографической конференции с международным участием «Петрология магматических и метаморфических комплексов» (г. Томск, 27–30 ноября 2018 г.). – Томск: НИ ТГУ, 2018. – С. 103–111.
22. **Бестемьянова К.В.** Геологическое строение и вещественный состав Зареченского барит-полиметаллического месторождения (Рудный Алтай) // Труды молодых ученых посвященные 90-летию ИГЕМ РАН «Новое в познании процессов рудообразования». – Москва: ИГЕМ РАН, 2020. – С.16–21.
23. Семиряков А.С., **Бестемьянова К.В.**, Гринев О.М. Новые данные U-Pb датирования цирконов зеленых сланцев Змеиногорского рудного района (Рудный Алтай) // Труды XXV международного симпозиума имени академика Усова «Проблемы геологии и освоения недр» (г. Томск, 5–9 апреля 2021 г.). – Томск: НИ ТПУ, 2021 – Т. 1. – С. 28–29.
24. Семиряков А.С., **Бестемьянова К.В.** Результаты U-Pb датирования вулканоплутонических образований Змеиногорского месторождения (Рудный Алтай) // Материалы XIX Всероссийской конференции студентов и аспирантов «Актуальные проблемы недропользования» (г. Санкт-Петербург, 12–16 апреля 2021 г.). – Санкт-Петербург: СПбГУ, 2021. – Т. 4. – С. 90–92.
25. **Bestemianova K.V.**, Grinev O.M. Age and conditions of formation of barite-polymetallic ores of Zmeinogorsky ore district (Ore Altai, Russia) // Goldschmidt – 2021. <https://doi.org/10.7185/gold2021.6817>
26. Grinev O.M., Semiryakov A.S., **Bestemianova K.V.**, Grinev R.O. Stages of formation of Rudny Altai in the pre-Devonian // Goldschmidt – 2021. <https://doi.org/10.7185/gold2021.5596>
27. Гринев О.М., **Бестемьянова К.В.**, Семиряков А.С., Гринев Р.О. Структура рудного поля и U-Pb датирование вмещающих и околорудных пород Змеиногорского барит-полиметаллического месторождения (Рудный Алтай) // Материалы Всероссийской конференции с международным участием «Динамика и взаимодействие геосфер Земли» (г. Томск, 8–12 ноября 2021 г.). – Томск: НИ ТГУ, 2021. –Т. 1. – С. 32–35.
28. **Бестемьянова К.В.**, Гринев О.М. Флюидные включения барит-полиметаллических месторождений Змеиногорского рудного района (Рудный Алтай) // Материалы конференции Годичного собрания Российского минералогического общества «Минералогические исследования в интересах развития минерально-сырьевого комплекса России и создания современных технологий» (г. Апатиты, 16–21 сентября 2024 г.). – Апатиты, Кольский научный центр Российской академии наук, 2024. – С. 118–119.

## Приложение А

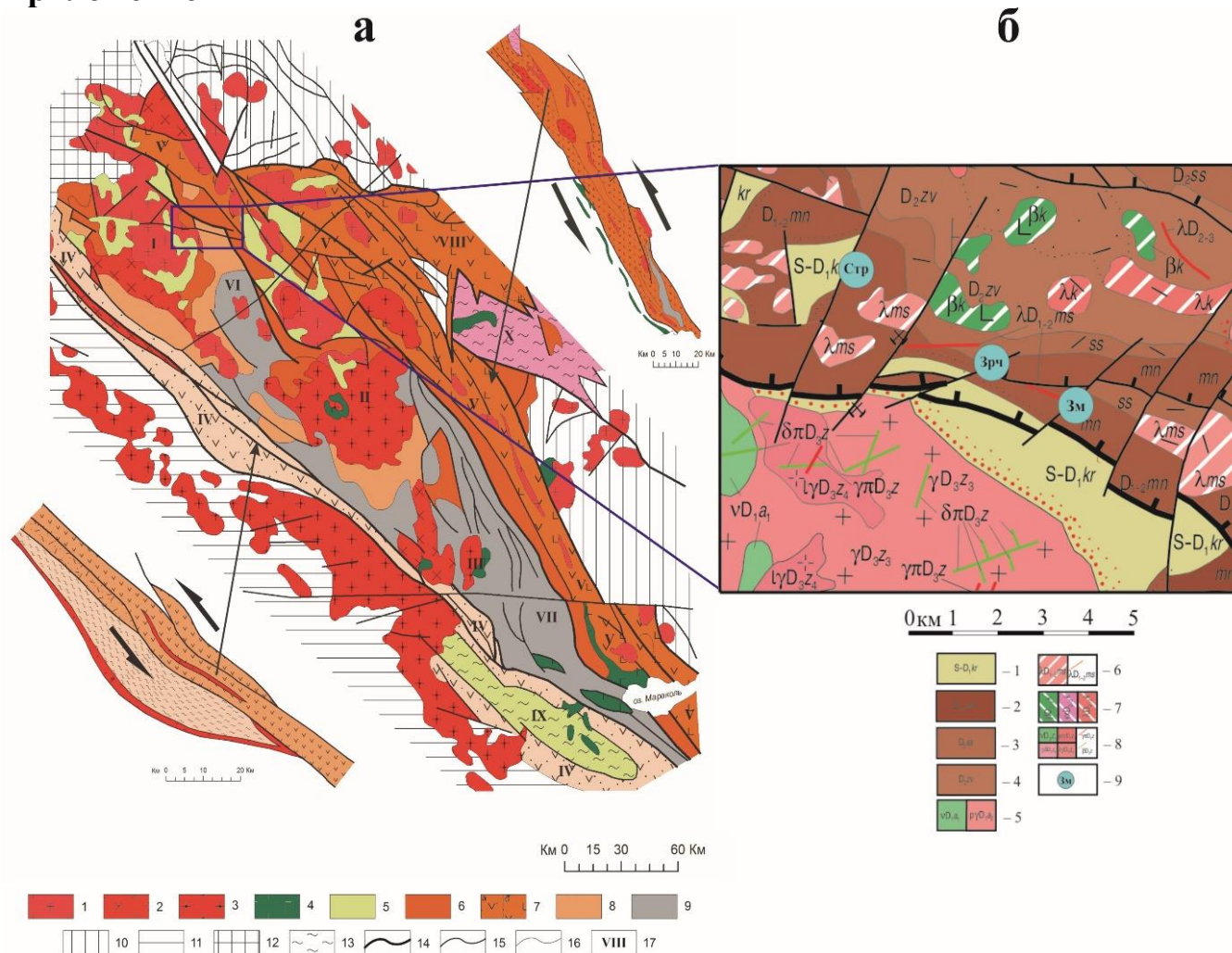


Рисунок 1. Рудноалтайский мегапрогиб (РАМП): а – схематическая карта геологического строения Рудноалтайского мегапрогиба по (Гринев, 2016) с местоположением Змеиногорского рудного района: 1 – гранитоиды змеиногорского комплекса, 2 – гранитоиды алейского комплекса, 3 – гранитоиды калбинского комплекса, 4 – интрузии основного состава нерасчлененные (D, C, P), 5 – метаморфические комплексы (Pz1), 6 – нерасчлененные толщи, 7 – толщи прибортовых депрессионных зон а) средне-верхнедевонские и б) ранне-средне-верхнедевонские, 8 – толщи среднего-верхнего девона быструшинского и белоубинского синклинориев, 9 – толщи верхнего девона – нижнего карбона Калба-Нарымской СФЗ, 10 – байкалиды и каледониды Горного Алтая, 11 – Калба-Нарымская СФЗ, 12 – Барнаульская впадина, 13 – динамометаморфические образования

выступов основания (R-C<sub>1</sub>), 14 – шовные зоны 1-го порядка, 15 – разрывные нарушения, 16 – границы структурно-вещественных комплексов, 17 – основные морфоструктурные элементы: I – Алейский гранитно-метаморфический свод (ГМС); II – Синюшинский свод; III – Соловьёвский свод; IV – Золотушинско-Иртышско-Курчумская прибортовая депрессионная зона, приуроченная к Иртышской зоне смятия; V – Змеиногорско-Белоубинско-Маркакольская прибортовая депрессионная зона, приуроченная к северо-восточной зоне смятия, VI – Быструшинский синклинорий; VII – Белоубинский синклинорий; VIII – Коргонский грабенообразный прогиб; IX – Курчумский выступ динамометаморфитов докембрия (?) – раннего палеозоя; X – Терехтинский выступ байкалид.

б – Геологическая карта-схема центральной части Змеиногорско-Зареченского рудного поля (фрагмент государственной геологической карты 1:200 000 масштаба, 2008 год). 1–4 – стратифицируемые образования: 1 – корбалихинская толща, 2 – мельничная свита, 3 – сосновская свита, 4 – заводская свита, 5–8 – магматические образования: 5 – алейский комплекс габбро-тоналит-плагиогранитный, 6 – мельнично-сосновский комплекс риолит-дацит-риолитовый, 7 – каменевский комплекс базальт-дацит-риолитовый, 8 – змеиногорский комплекс габбро-гранит-лейкогранитовый, 9 – изучаемые барит-полиметаллические месторождения: Зм – Змеиногорское, Зрч – Зареченское, Стр – Стрижковское.



## Приложение А

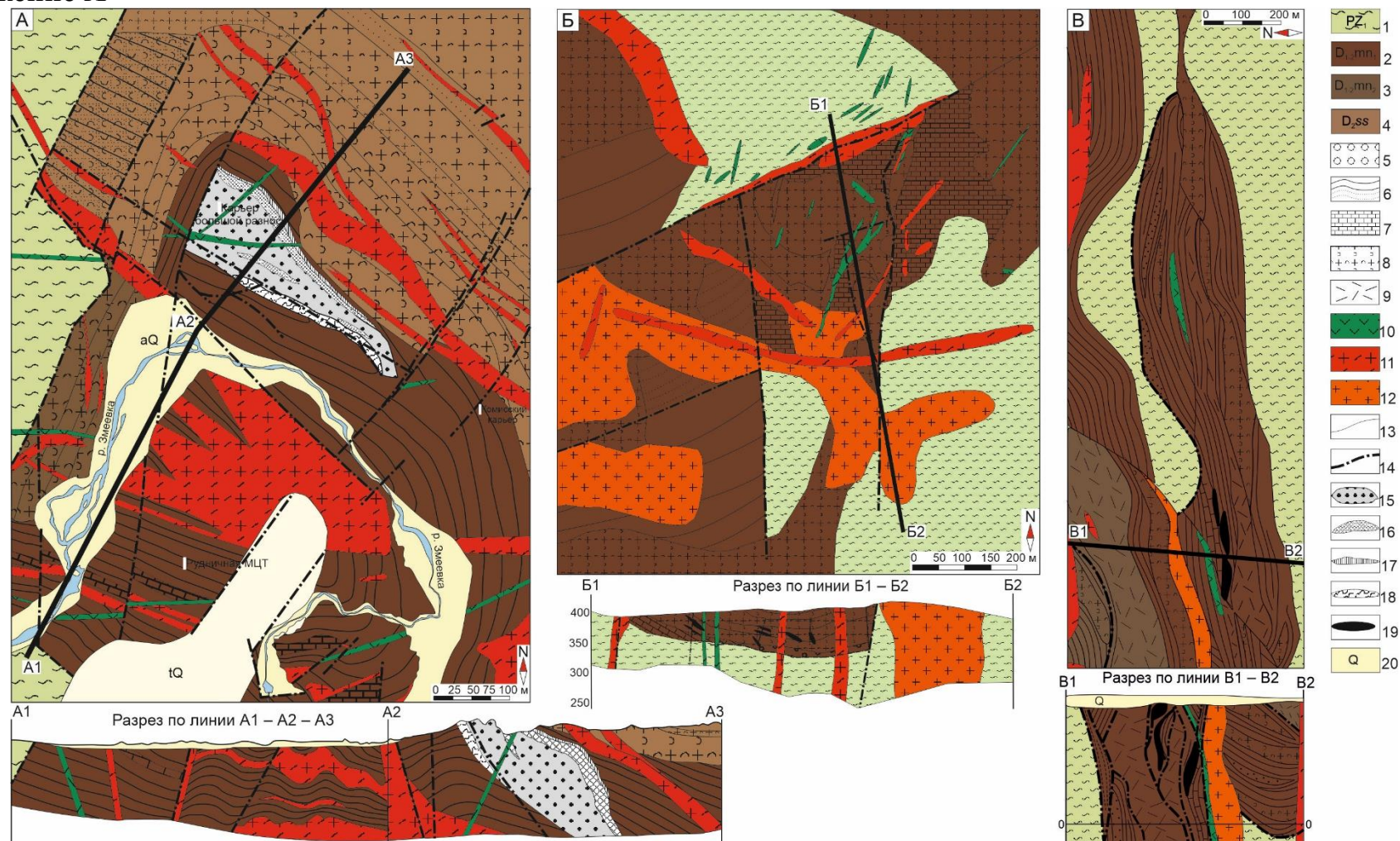


Рисунок 2. Схемы строения барит-полиметаллических месторождений Змеиногорского рудного района: А – Змеиногорское, Б – Стрижковское, В – Зареченское (на основе: Вьюнов, Стахович, 1949; Дмитриев, 1957; Чекалин и др., 1988; Гринев и др., 2021, 2022) с изменениями и дополнениями. 1 – метapесчанники и кварц-хлорит-серицитовые сланцы корбалихинской толщи ( $PZ_1$ ), 2 – нижнемельничная подсвита ( $D_{1-2mn1}$ ), 3 – верхнемельничная подсвита ( $D_{1-2mn2}$ ), 4 – сосновская свита ( $D_{2ss}$ ), 5–9 – литологический состав отложений: 5 – базальный конгломерат, 6 – глинисто-терригенная пачка, 7 – терригенно-карбонатная пачка, 8 – туфы кислого состава; 9 – лавы преимущественно кислого состава; 10 – габбро, долериты и базальт-порфиры, 11 – дациты, риолиты и их порфиры, 12 – гранит-порфиры, плагитогранит-порфиры, диорит-порфиры, 13 – геологические границы, 14 – разрывные нарушения, 15 – микрокварциты, 16 – золото-серебро-барит-полиметаллические руды, 17 – баритовые руды, 18 – барит-кварцитовые брекчии, 19 – рудные тела, нерасчлененные по составу, 20 – четвертичные отложения.

## Приложение Б

Этап	Гидротермально-метасоматический				
Стадии	хлорит-серицит-кварцевая	галенит-халькопирит-сфалеритовая	гематит-кальцит-баритовая	халькозин-теннантит-борнитовая	карбонат-глисовая
Минералы					
Кварц	I	IIa IIb			
Халцедон					
Серицит	I	II			
Хлорит	I	IIa IIb			
Пирит	I	Ia Ib		II	
Халькопирит		I		II	
Сфалерит		Ia Ib		II	
Галенит		I			
Тетраздрит					
Арсенопирит					
Гринокиит*					
Аргентит					
Борнит					
Теннантит					
Халькозин					
Самор.серебро					
Электрум					
Штромейерит					
Ялпаит					
Самор.теллур					
Гессит					
Амальгамы (Au,Ag)*					
Галеновисмутит*					
Самор. висмут*					
Пильзенит*					
Балканит*					
Маккинстриит*					
Полибазит					
Ковеллин					
Золото		I	II		II
Барит			I		
Кальцит					
Доломит					
Эпидот					
Флюорит					
Гематит					
Гипс					
Интенсивность проявления тектоники	↑	↑	↑	↑	↑
Текстуры	Массивная, вкрапленная, прожилковая	Массивная, брекчиевая, прожилково-вкрапленная, вкрапленная	Массивная, пятнистая, прожилковая	Гнездовая, прожилковая	Прожилковая, гнездовая
Структуры	Порфиробластовая, гранобластовая, лепидогранобластовая	неравномернозернистая, мелко - средне - крупнозернистая, идиоморфно-, гипидиоморфно-, аллотриоморфнозернистая		коррозионная, замещения	тонко-, мелко-, гипидиоморфно-, зернистая
		коррозионная, эмульсионная, дробления, колломорфная, смятия, замещения, петельчатая			
Температура образования(°C), соленость, состав растворов, давление (кбар)	240-270°C 1.5-5.9 масс.% экв. NaCl MgCl <sub>2</sub> -KCl-H <sub>2</sub> O 0.15-0.53 кбар	165-230°C 1.6-4.0 масс. % экв. NaCl FeCl <sub>2</sub> -H <sub>2</sub> O 0.07-0.28 кбар	95-220°C 3.0-9.5 масс. % экв. NaCl MgCl <sub>2</sub> -NaCl-H <sub>2</sub> O 0.01-0.20 кбар	не определено	не определено

Рисунок 1. Схема последовательности минералообразования (толщина линий пропорциональна интенсивности процесса).

Примечание: \* – минералы, диагностированные впервые



## Приложение Б

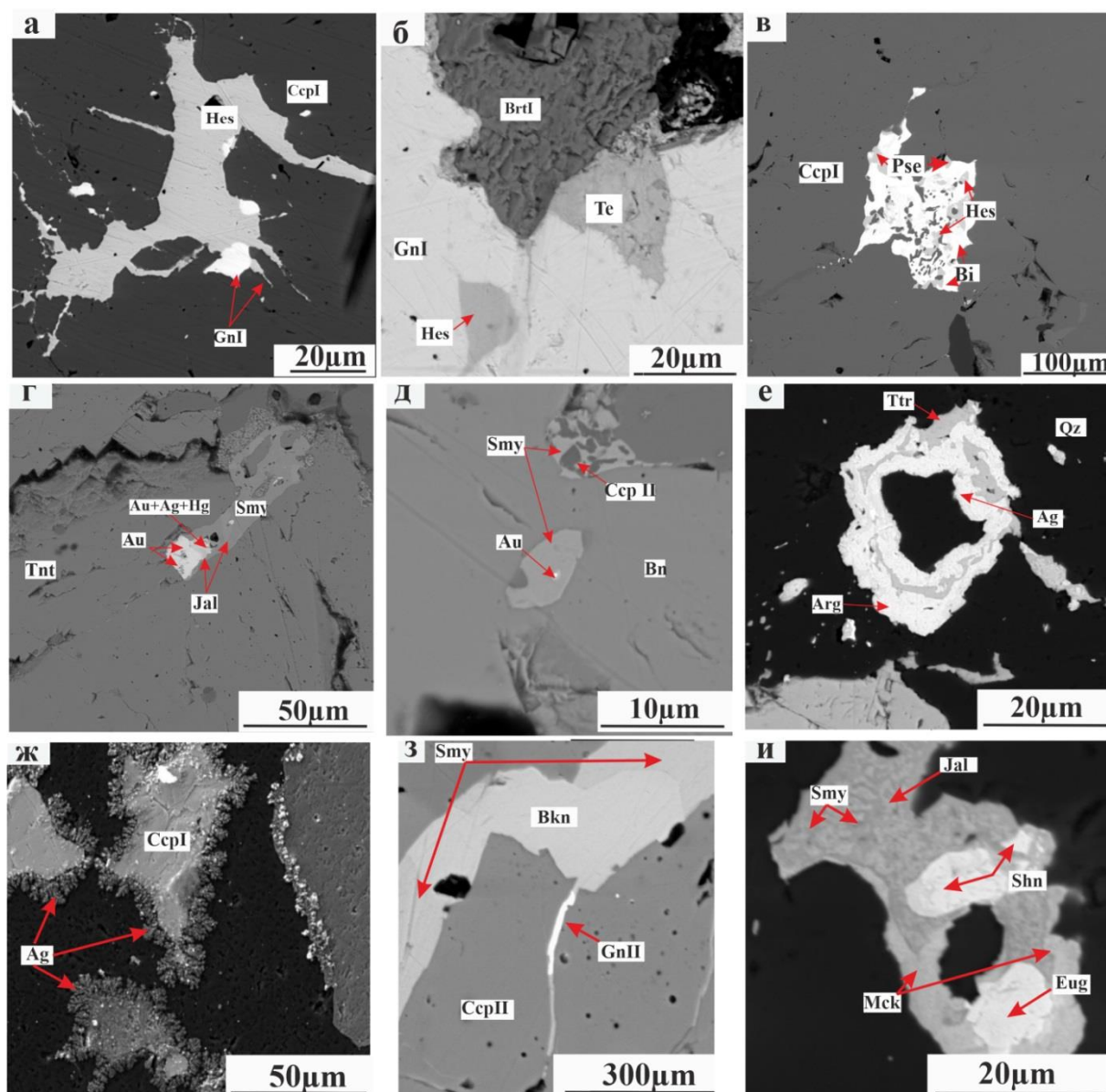


Рисунок 2. Морфология обособлений и характер распределения редкой минерализации: а–в галенит-халькопирит-сфалеритовый; г–и халькозин-теннантит-борнитовый парагенезисы: а – обособление гессита, корродирующее халькопирит I; б – самородный теллур и гессит, корродирующие галенит I; в – гнездовое обособление, сложенное пильзенитом, самородным висмутом и гесситом; г – прожилок штрмейерита в краевой части прожилка обособление самородного золота в ассоциации с ялпаитом и амальгамами золота и серебра; д – обособление штрмейерита в тесной ассоциации с халькопиритом II и золотом, корродирующие борнит; е – кольцообразное, зональное обособление, сложенное тетраэдритом, по которому развивается аргентит, по аргентиту в свою очередь развивается самородное серебро; ж – дендритовые агрегаты самородного серебра, развивающиеся по краевым частям обособлений халькопирита I; з – прожилок, сложенный штрмейеритом в ассоциации с балканитом и галенитом II; и – обособления штрмейерита в ассоциации с ялпаитом, шахнеритом, евгенитом и маккинстриитом; (а, в–и образцы Зареченского; б – Стрижковского месторождений). Снимки получены на сканирующем электронном микроскопе (Tescan Mira 3 LMU) в режиме BSE (обратно-отраженных электронов); снимок ж – в режиме SE (вторичных электронов).

*Примечание:* Ag – самородное серебро; Au – самородное золото; Arg – аргентит; Bi – самородный висмут; Bkn – балканит; Bn – борнит; Brt – барит; Ccp – халькопирит; Eug – евгенит; Gn – галенит; Hes – гессит; Jal – ялпаит; Mck – маккинстриит; Pse – пильзенит; Shn – шахнерит; Smy – штрмейерит; Te – самородный теллур; Ttr – тетраэдрит.

## Приложение В

Таблица 1. Результаты термо- и криометрических исследований индивидуальных флюидных включений в сфалерите, кварце, барите и кальците Змеиногорского, Зареченского и Стрижковского месторождений.

№ пробы	Минерал	n	Генерация флюидных включений	Фазовый состав	T <sub>гом.</sub> , °C	T <sub>эвт.</sub> , °C	T <sub>пл. льда</sub> , °C	Соленость, масс. % экв. NaCl	ρ раствора, г/см <sup>3</sup>	Давление, кбар
<i>Хлорит-серицит-кварцевый парагенезис</i>										
12МЗр.-017	Кварц I	12	П	ГЖ	207–220	-28...-34	-2.0...-3.6	3.39–5.86	0.86–0.88	0.22–0.23
12МЗр.-019	–«–	14	П	ГЖ	225–260	-30...-36	-1.3...-2.9	2.24–4.80	0.82–0.83	0.25–0.45
12МЗр.-028	–«–	14	П	ГЖ	239–267	-26...-30	-0.9...-1.7	1.57–2.90	0.85–0.89	0.32–0.51
12МСтр.-156	–«–	12	П	ГЖ	200–239	-29...-35	-1.7...-2.8	2.90–4.65	0.88–0.91	0.15–0.32
12МСтр.-157	–«–	12	П	ГЖ	233–270	-28...-33	-1.2...-2.5	2.07–4.18	0.86–0.88	0.29–0.53
14МСтр.-182	–«–	11	П	ГЖ	225–265	-27...-34	-1.5...-3.1	2.57–5.11	0.87–0.88	0.25–0.49
<i>Галенит-халькопирит-сфалеритовый парагенезис</i>										
14МЗр.-008	Сфалерит Ia	4	П	ГЖТ	219–228	-30...-35	-1.6...-2.0	2.74–3.39	0.87–0.88	0.22–0.26
14МЗр.-044	–«–	4	П	ГЖТ	221–229	-31...-37	-1.8...-2.4	3.06–4.03	0.83–0.84	0.23–0.27
14МЗр.-047	–«–	3	П	ГЖТ	223–231	-32...-36	-1.3...-1.7	2.24–2.80	0.85–0.89	0.24–0.28
14МСтр.-036	–«–	4	П	ГЖ	219–229	-29...-35	-1.5...-2.0	2.57–3.39	0.88–0.91	0.22–0.27
14МСтр.-041	–«–	5	П	ГЖ	218–231	-28...-34	-1.1...-1.7	1.91–2.90	0.86–0.90	0.22–0.28
14МЗм.-089	–«–	3	П	ГЖТ	217–230	-31...-33	-0.9...-1.4	1.57–2.41	0.88–0.89	0.22–0.27
14МЗм.-075	–«–	3	П	ГЖ	224–231	-30...-34	-1.3...-1.9	2.24–3.23	0.79–0.90	0.25–0.28
12МЗм.-069	Сфалерит Ib	6	П	ГЖ	172–180	-32...-34	-1.4...-2.0	2.41–3.39	0.91–0.91	0.08–0.11
14МСтр.-170	–«–	7	П	ГЖ	168–182	-29...-31	-1.5...-2.1	2.57–3.55	0.91–0.92	0.07–0.10
14МСтр.-165	–«–	7	П	ГЖ	165–178	-27...-30	-1.1...-1.9	1.91–3.23	0.91–0.92	0.07–0.09
14МЗр.-045	–«–	6	П	ГЖ	174–182	-25...-31	-1.4...-2.1	2.41–3.55	0.90–0.91	0.09–0.10
14МЗр.-076	–«–	6	П	ГЖ	165–180	-28...-33	-1.0...-1.7	1.74–2.90	0.91–0.92	0.07–0.10
12МСтр.-156	Кварц II	11	П	ГЖ	170–185	-36...-42	-1.4...-2.2	2.41–3.71	0.91–0.92	0.08–0.11
12МЗр.-056	–«–	12	П	ГЖ	182–192	-40...-43	-1.1...-2.3	1.91–3.71	0.90–0.91	0.10–0.13
14МЗр.-074	–«–	12	П	ГЖ	175–189	-38...-42	-0.9...-2.4	1.55–4.05	0.90–0.91	0.09–0.12
12МСтр.-170	–«–	10	П	ГЖ	168–187	-37...-43	-1.3...-1.9	2.07–3.06	0.90–0.92	0.07–0.11
<i>Гематит-кальцит-баритовый парагенезис</i>										
12МЗм.-055	Барит II	12	П	ГЖ	178–210	-28...-36	-3.9...-4.8	6.30–7.59	0.91–0.94	0.09–0.18
12МЗм.-069	–«–	15	П	ГЖ	215–220	-31...-35	-4.9...-5.4	7.73–8.41	0.91–0.93	0.13–0.20
12МСтр.-048	–«–	11	П	ГЖ	160–187	-32...-36	-3.7...-6.3	6.01–9.48	0.94–0.95	0.06–0.11
12МЗр.-005	–«–	11	П	ГЖ	164–218	-29...-34	-4.5...-5.7	7.17–8.81	0.92–0.95	0.07–0.19
12МЗр.-074	–«–	12	П	ГЖ	176–189	-28...-33	-5.0...-6.1	7.86–9.44	0.95–0.96	0.09–0.11
12МСтр.-079	Кальцит I	10	П	ГЖ	98–130	-28...-30	-1.8...-2.4	3.06–4.03	0.96–0.98	0.01–0.03
12МСтр.-170	–«–	11	П	ГЖ	110–127	-27...-31	-2.5...-2.8	4.18–4.65	0.97–0.98	0.01–0.02
14МЗр.-039	–«–	12	П	ГЖ	90–125	-27...-29	-2.9...-3.4	4.80–5.56	0.98–0.99	0.01–0.02
12МЗр.-056	–«–	14	П	ГЖ	95–128	-31...-34	-1.9...-2.7	3.23–4.49	0.97–0.98	0.01–0.02