

Вещественный состав вмещающих пород, минералогия и изотопная геохимия серы колчеданно-полиметаллических месторождений типа VMS Большого Алтая

Аннотация. В работе представлены результаты сравнительного анализа вещественного состава вмещающих пород, минералогии и изотопного состава серы ($\delta^{34}\text{S}$) колчеданно-полиметаллических месторождений типа VMS в пределах Рудноалтайской металлогенической зоны Большого Алтая. На основе обобщения обширного фонда литературных данных и оригинальных петрографических исследований выделены четыре типа рудоносных ассоциаций фаций и соответствующие им минеральные типы месторождений, различающиеся соотношениями основных сульфидов. Созданная база данных, включающая 1687 определений $\delta^{34}\text{S}$, позволила выявить значительные вариации изотопного состава серы сульфидов (от -28,2 до +13,4 ‰) и сульфатов (от +14,8 до +24,5 ‰), что свидетельствует о наличии магматогенных, морских и биогенных источников. Установлены региональные отличия: для российского и казахстанского сегментов характерно доминирование магматогенной серы, тогда как в китайской части фиксируется более активное участие серы, связанной с бактериальной сульфатредукцией. Крупные месторождения отличаются гетерогенным составом серы, отражающим длительную эволюцию палеогидротермальных систем. Сочетание конседиментационных, тектонических и метаморфических процессов определяют: 1) сингенетическое образование руд в девонских гидротермально-осадочных системах (по механизмам «чёрных курильщиков» и «придонного замещения»); 2) постседиментационное преобразование в позднем палеозое–мезозое. Результаты исследования создают основу для совершенствования прогнозно-поисковых моделей в пределах Алтае-Саянской складчатой области и её зарубежных аналогов.

Ключевые слова: Большой Алтай, VMS, петрографо-минералогические исследования, изотопный состав серы.

СЕРАВИНА ТАТЬЯНА ВАЛЕРЬЕВНА, кандидат геолого-минералогических наук, заведующая лабораторией, seravina@tsnigri.ru

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

The host rock composition, mineralogy, and sulfur isotope geochemistry of polymetallic VMS type deposits in the Greater Altai

T. V. SERAVINA

Federal State Budgetary Institution “Central Research Institute of Geological Prospecting for Base and Precious Metals” (FSBI “TSNIGRI”), Moscow

Abstract. The paper presents results of a comparative analysis of the host rock composition, mineralogy, and sulfur isotope composition ($\delta^{34}\text{S}$) of polymetallic VMS type deposits within the Rudnyi Altai metallogenic zone of the Greater Altai. Based on generalization of extensive literary data and original petrographic studies, four types of ore-bearing facies associations and their corresponding mineral types of ore deposits were distinguished, that differed from each other in ratios of the main sulfides. The created database, that includes 1687 determinations of $\delta^{34}\text{S}$, has made it possible to reveal significant variations in the sulfur isotope composition of the sulfides (from -28,2 ‰ to +13,4 ‰) and sulfates (from +14,8 ‰ to +24,5 ‰), which indicates the presence of magmatogenic, marine, and biogenic sources. Regional differences have been established: the Russian and Kazakh segments of the Greater Altai are characterized by a dominance of magmatogenic sulfur, while the Chinese part shows a more active participation of sulfur associated with bacterial sulfate reduction. The large ore deposits are characterized by a

heterogeneous sulfur isotope composition, which reflects a prolonged evolution of the paleohydrothermal systems. A combination of con-sedimentation, tectonic, and metamorphic processes determine: 1) syngenetic ore formation in the Devonian hydrothermal-sedimentary systems (according to the mechanisms of "black smokers" and "sub-seafloor replacement") and 2) post-sedimentation transformation during the Late Paleozoic–Mesozoic. The results of the study provide a basis for improving forecasting-prospecting models within the Altai-Sayany folded region and its foreign analogues.

Key words: Greater Altai, VMS, petrographic and mineralogical studies, sulfur isotope composition.

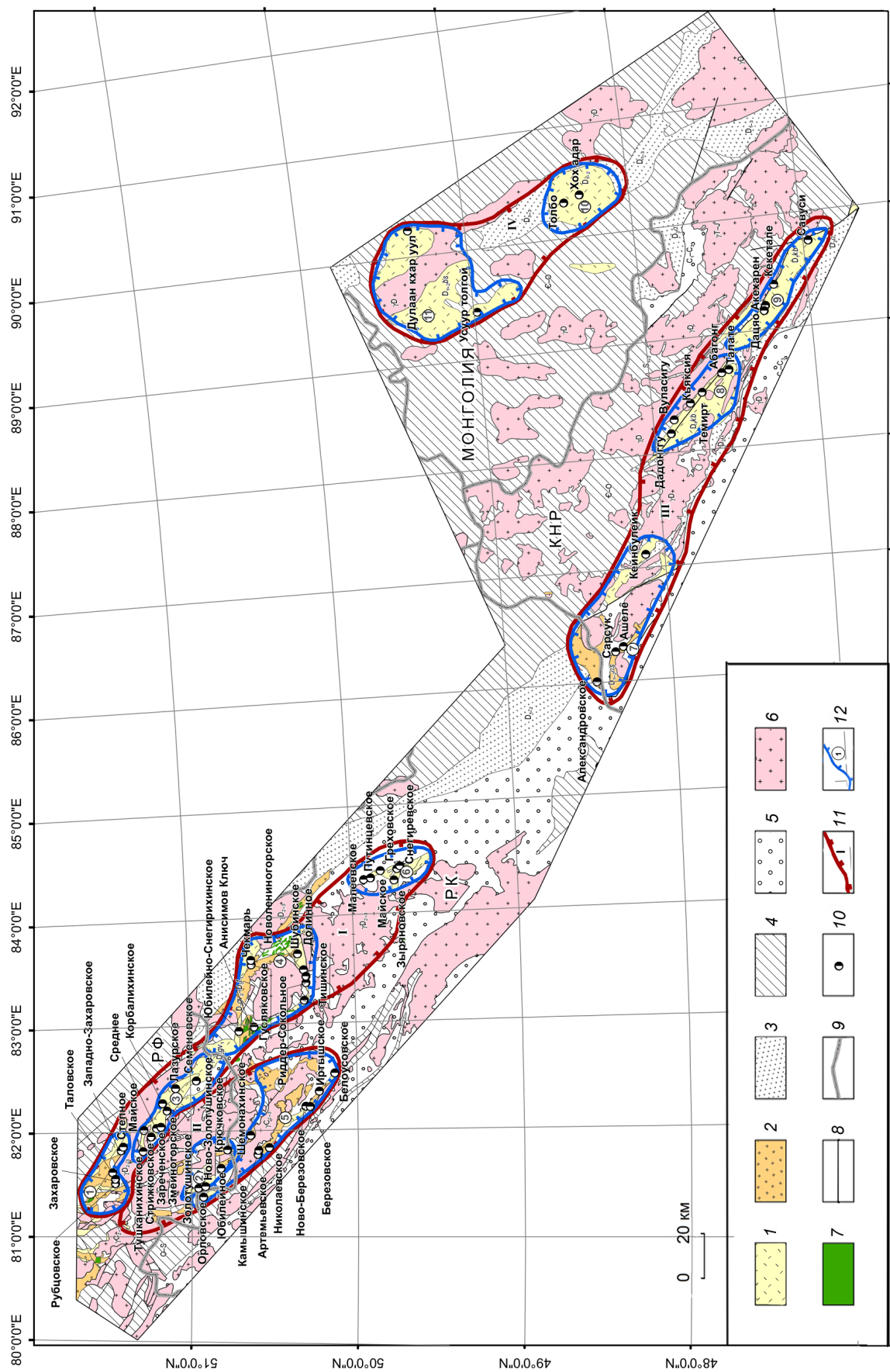
Введение. Большой Алтай является важной частью Центрально-Азиатского складчатого пояса (ЦАСП), расположен в пределах Алтае-Саянской складчатой области (металлогенической провинции) и простирается более чем на 2500 км через территорию Российской Федерации, Республику Казахстан, северо-запада КНР (Синьцзян) и западной Монголии. В его пределах выделяется ряд металлогенических зон, в том числе Рудно-алтайская, где выявлено большое количество колчеданно-полиметаллических месторождений в вулканогенных ассоциациях (VMS). Она подразделяется на Змеиногорско-Зыряновскую (Быструшинско-Синюшинскую), Алейско-Прииртышскую, Цунху-Чинхэскую (Китайский Алтай), Делуун-Сагайскую (Монгольский Алтай) подзоны (рис. 1). Формирование рудной минерализации здесь тесно связано с интенсивным девонским вулканизмом в рифтогенной обстановке, что привело к образованию рудоносных вулканогенно-осадочных формаций. Несмотря на длительную историю геологоразведочных работ, результатом которых стали открытие и освоение ряда крупных объектов, многие фундаментальные аспекты генезиса этих месторождений остаются предметом научной дискуссии.

Многочисленные исследования [8, 10, 14, 17, 18, 23, 24, 26, 27, 29, 30, 34, 36, 49, 57, 58, 61, 64, 73, 78, 82, 86], включая работу, представленную в журнале «Отечественная геология» [44], вносят существенный вклад в систематизацию знаний о регионе. В указанной статье проведён детальный анализ структурно-формационного районирования, пространственного распределения рудных районов Рудноалтайской зоны и общих геодинамических рамок рудообразования. Были выделены и охарактеризованы рудоносные формации, установлены их возрастные диапазоны, а также проведена корреляция между сегментами зоны. Особое внимание уделялось специфике металло-

гении различных частей региона: от «классических» колчеданно-полиметаллических месторождений с повышенными содержаниями золота и серебра в казахстанско-российском секторе до более сложных и разнообразных по типам объектов в китайской части. Однако, как было отмечено в публикации, достигнутый прогресс в геологоразведочных работах последних десятилетий не привёл к коренному увеличению минерально-сырьевой базы и не сопровождался открытием новых крупных месторождений. Это указывает на необходимость углублённого и комплексного изучения рудогенеза всех выявленных объектов.

Цели настоящего исследования – уточнение механизмов формирования месторождений типа VMS в пределах российской, казахстанской и китайской частей Большого Алтая на основе комплексного анализа петрографического состава вмещающих пород, минералогии руд и изотопного состава серы ($\delta^{34}\text{S}$), а также выявление критериев высокой продуктивности рудных объектов и создание научной основы для совершенствования прогнозно-поисковых моделей, ориентированных на обнаружение новых месторождений. Достижение этой цели особенно актуально в контексте необходимости воспроизводства минерально-сырьевой базы и расширения международного сотрудничества в пределах трансграничного региона Большого Алтая.

Для её реализации в работе последовательно решаются следующие задачи: характеристика вещественного состава рудовмещающих толщ и окколорудных метасоматитов с выделением рудоносных ассоциаций фаций, контролирующих орудование; систематизация минеральных типов колчеданно-полиметаллических руд и установление их связи с выделенными фациями; обобщение данных по изотопному составу серы для определения основных источников серы и их вклада в разных рудных районах металлогенической зоны;



а также уточнение механизмов формирования, которые подтверждаются представленным фактическим материалом.

Вещественный состав вмещающих пород и околорудных метасоматитов. Петрографическое изучение вмещающих пород и околорудных метасоматитов является фундаментальной основой для расшифровки условий формирования и локализации колчеданно-полиметаллического оруденения типа VMS. В рамках настоящего исследования проведён комплексный анализ вещественного состава пород, слагающих рудовмещающие толщи рудных районов Рудноалтайской металлогенической зоны (российский, казахстанский и китайский Алтай). Оно базировалось на обобщении и пересмотре обширного массива литературных данных, включая отечественные и зарубежные публикации, а также на результатах детальных петрографических исследований собственных материалов, полученных в процессе полевых работ и изучения шлифов.

В ходе исследования были установлены ассоциации фаций, вмещающие колчеданно-полиметаллическое оруденение:

- 1) (риолит)-известняково-терригенные (рудные районы: Змеиногорский, Лениногорский);
- 2) риолит-кремнисто-(карбонатно)-алевролитовые (рудные районы: Змеиногорский, Рубцовский, Зыряновский, Келан, Майзи);
- 3) базальт-риолит (карбонатно, углеродисто)-кремнистые (рудные районы: Змеиногорский, Рубцовский, Золотушинский, Лениногорский, Прииртышский, Зыряновский, Ашеле, Келан);

4) терригенно-базальт-риолитовые (рудные районы: Змеиногорский, Золотушинский, Лениногорский, Прииртышский, Ашеле, Майзи).

Доля вулканитов покровных фаций в рудовмещающем разрезе составляет (в %): 5–10, 10–15, 15–20, 30–50 соответственно.

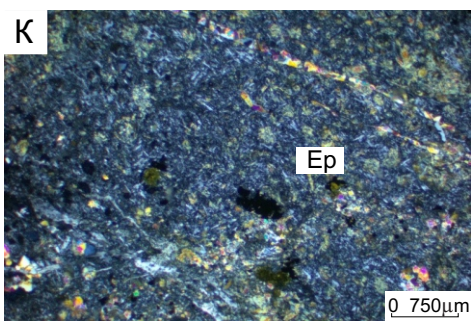
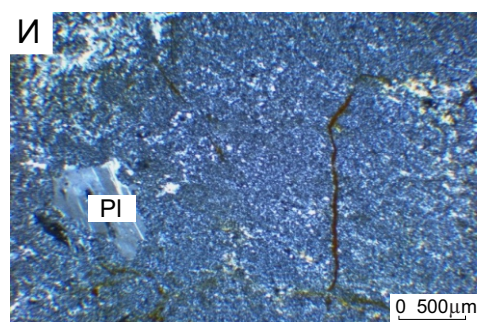
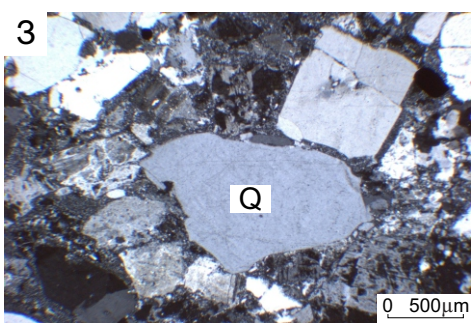
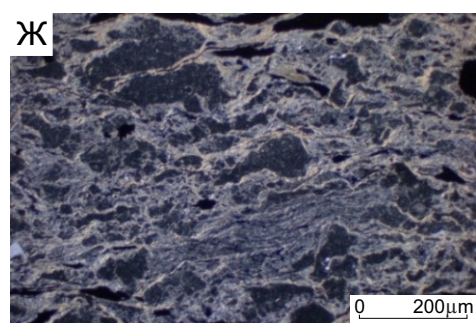
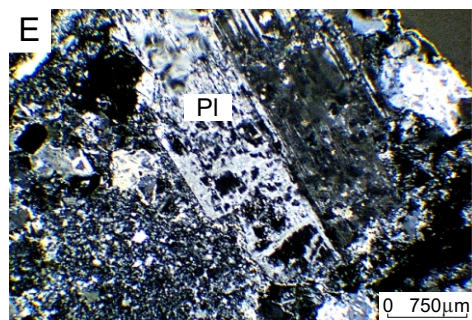
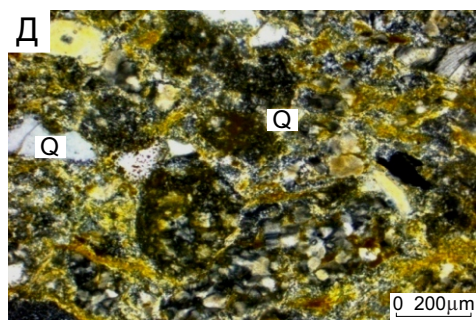
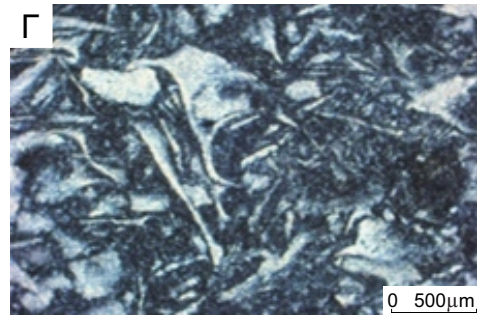
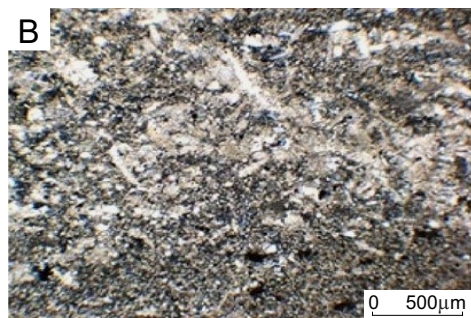
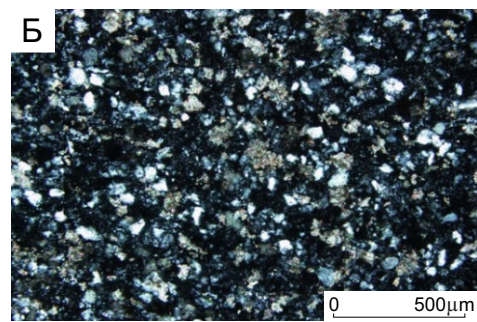
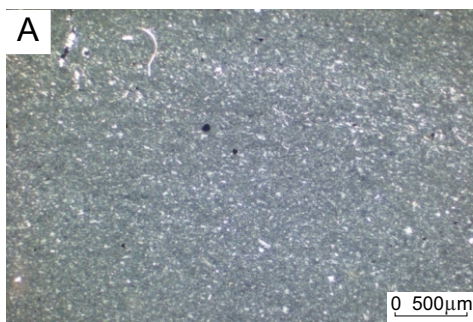
Также выявлены общие закономерности и региональные особенности петрографического состава, структурно-текстурных характеристик и спектра гидротермально-метасоматических преобразований пород.

Российский Алтай. Змеиногорский рудный район. Рудовмещающие толщи Змеиногорского рудного района характеризуются ритмичным переслаиванием кремнистых, терригенных и вулканогенных отложений [17, 25, 30, 39, 42, 46, 47, 48, 50]. Наиболее распространёнными породами являются кремнистые алевролиты, туффиты, тефроиды, реже встречаются туфопесчаники и туфогравелиты (рис. 2). Также важной петрографической особенностью является сочетание кислых (риолиты, игнимбриты) и основных вулканитов. Терригенный компонент представлен глинисто-известковистыми и углеродистыми разностями алевролитов и аргиллитов.

Например, рудовмещающие отложения Зареченского месторождения представлены существенно кремнистыми алевролитами и кремнистыми породами, залегающими на кислых вулканитах и перекрытыми известковистыми алевролитами с прослоями известняков. На Майском месторождении отмечается присутствие конгломератобрекчий риолитового состава. Рудовмещающий разрез

Рис. 1. Схематическая формационная карта Рудноалтайской металлогенической зоны с месторождениями типа VMS. С использованием материалов [29, 44]:

1–2 рудоносные формации: 1 – базальтсодержащая андезит-дацит-риолитовая известково-кремнисто-терригенная ($D_1e-D_2gv_1$) (Российская Федерация и Республика Казахстан), формация Кангбутибао ($D_1lx-pr-D_1e$) (Китайская Народная Республика) и формация Бааст уул (D_1pr-D_2ef) (Монголия) (ранний цикл вулканической активности), 2 – контрастная базальт-риолитовая кремнисто-терригенная ($D_2gv_2-D_3f_1$) (Российская Федерация и Республика Казахстан) и формация Ашеле (D_1e-D_2ef) (Китайская Народная Республика) (поздний цикл вулканической активности); 3 – отложения девонского возраста (без расчленения); 4 – подрудные отложения (без расчленения); 5 – перекрывающие отложения (без расчленения); 6 – гранитные комплексы (без расчленения); 7 – габбро-долериты (без расчленения); 8 – разрывные нарушения; 9 – государственные границы; 10 – месторождения типа VMS; 11 – границы подзон: I – Змеиногорско-Зыряновская (Быструшинско-Синюшинская), II – Алейско-Прииртышская, III – Цунху-Чинхэская (Китайский Алтай), IV – Делуун-Сагсайская (Монгольский Алтай), 12 – границы рудных районов: 1 – Рубцовский, 2 – Золотушинский, 3 – Змеиногорский, 4 – Лениногорский, 5 – Прииртышский, 6 – Зыряновский, 7 – Ашеле (бассейны Ашеле (Ashele basin) и Чонгуер (Chonghuer basin)), 8 – Келан (Kelang basin), 9 – Майзи (Maizi basin), 10 – Хох адар (Khokh adar), 11 – Дулаан кхар уул (Dulaan khar uul)



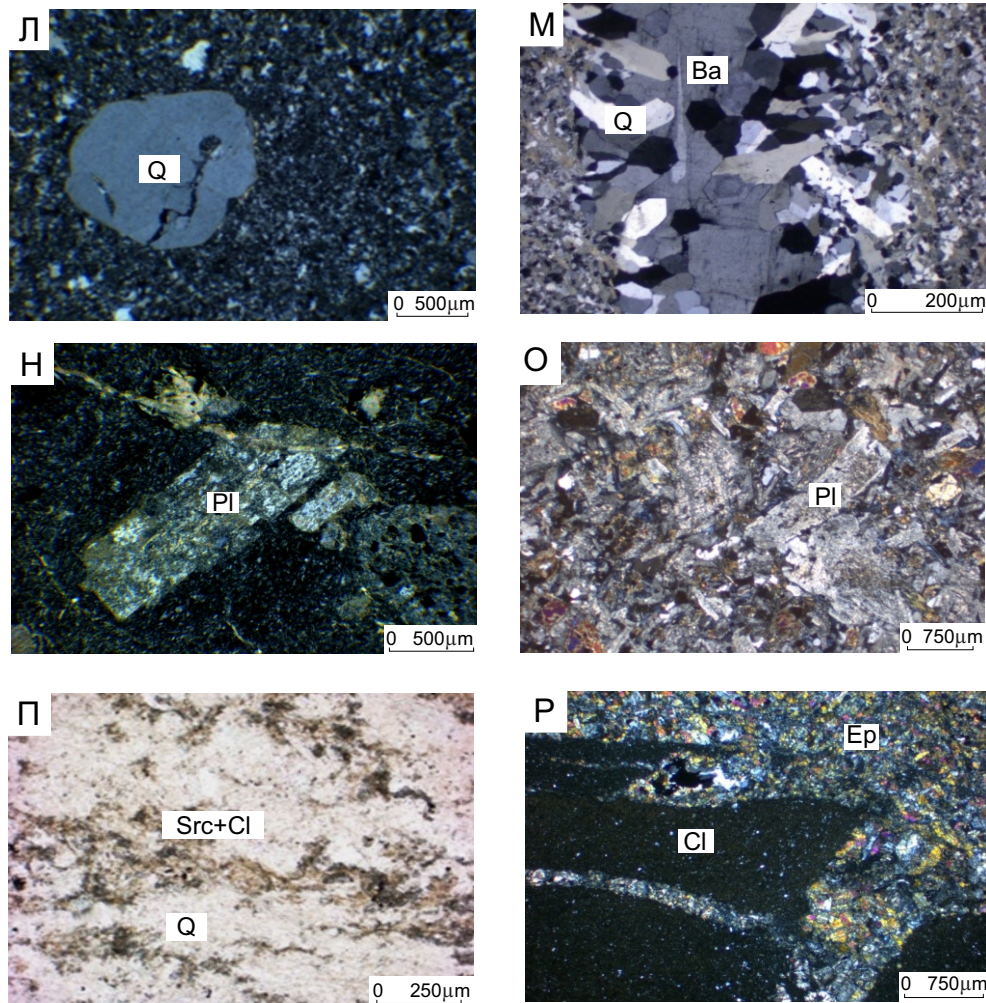


Рис. 2. Вулканогенно-осадочные породы Змеиногорского, Рубцовского и Золотушинского рудных районов. С использованием материалов [46, 48]:

А – кремнистый туффит (Тушканихинское рудопроявление); Б – известково-кремнистый туфоалевролит (Отрадинское рудопроявление); В – известковый алевролит с микрофауной плохой сохранности (Хлебниковское рудопроявление); Г – витрокластический туф риолитового состава (Зайцевское рудопроявление); Д – тефроид риолитового состава (Тушканихинское рудопроявление); Е – игнимбрит с густовкрапленной (невадитовой) структурой (Тушканихинское рудопроявление); Ж – игнимбрит флюидальный серицитизированный (Западно-Захаровское месторождение); З – автомагматическая брекчия риолитового состава (Каменское рудопроявление); И – окварцованный олигофировый риолит (рудопроявление Привет); К – лавы контактово-изменённых миндалекаменных базальтов (Головинско-Ганьковское рудопроявление); Л – крупновкрапленный риолит (Зайцевское рудопроявление); М – крупновкрапленный риолит с включениями длиннопризматического барита, гребенчатого кварца и идиоморфного пирита (Западно-Захаровское месторождение); Н – базальт (Титовское рудопроявление); О – долерит порфировой структуры с офитовой основной массой (Каменское рудопроявление); П – серицит-хлорит-кварцевый метасоматит с кальцитом (по кремнистым туффитам?) (Зайцевское рудопроявление); Р – хлоритолит с прожилками эпидозитов (Головинско-Ганьковское рудопроявление); николи скрещены; минералы: Q – кварц, Pl – плагиоклаз, Ep – эпидот, Ba – барит, Cl – хлорит, Src – серицит

Семеновского месторождения представлен существенно кремнистыми вулканогенно-осадочными породами, залегающими на афировых, а перекрытыми крупновкрапленными риолитами. Надруд-

ное пространство Корбалихинского месторождения выполнено чередованием лав и лавобрекчий основного состава, углеродисто-глинистых алевролитов и аргиллитов, кремнистых туффитов и

туфогравелитов. На Лазурском месторождении в надрудном и подрудном пространствах присутствуют лавы, лавобрекчии, туфы андезибазальтового состава.

Характерно развитие гидротермально-метасоматических изменений, таких как окварцевание, серицитизация, хлоритизация и пропилитизация, которые сопровождают рудные залежи, формируя зоны окolorудных изменений.

Рубцовский рудный район. Рудовмещающие породы Рубцовского рудного района представлены вулканогенно-осадочными отложениями базальтриолитового состава с преобладанием кремнисто-терригенных и туфогенных разностей [30, 32, 42, 45, 52] (см. рис. 2).

Так, для Степного месторождения характерна рудовмещающая пачка, сложенная кремнисто-глинистыми и глинистыми алевролитами, туфами и туффитами кислого состава. На Таловском месторождении руды также приурочены к вулканогенно-осадочным отложениям, где преобладают кремнисто-глинистые алевролиты. На Захаровском месторождении рудовмещающий разрез представлен туфогенными кремнистыми алевролитами, туффитами и фтанитами, составляющими до 65 % разреза, а также лавами и туфами риолитового состава. Аналогично на Рубцовском месторождении основными рудовмещающими породами являются кремнистые алевролиты, песчаники и туфы кислого состава.

Гидротермально-метасоматические изменения пород проявляются в окварцевании, серицитизации, хлоритизации и карбонатизации. На Захаровском и Рубцовском месторождениях широко развиты серицит-кварцевые и серицит-хлорит-кварцевые метасоматиты. На Степном месторождении отмечаются также мусковит-гидрослюдисто-кварцевые и карбонат-хлорит-кварц-серицитовые породы, а для Таловского характерно развитие пропилитов.

Золотушинский рудный район. Петрографический состав вмещающих пород месторождений и рудопроявлений Золотушинского рудного района характеризуются сложным сочетанием вулканогенных и осадочных образований [30, 42] (см. рис. 2).

На примере анализа строения месторождений Юбилейное и Новозолотушинское установлено, что рудовмещающая толща сложена преимущественно вулканогенно-осадочными породами, среди которых преобладают лавы кислого состава, разнообломочные туфы, тефроида, туфопесча-

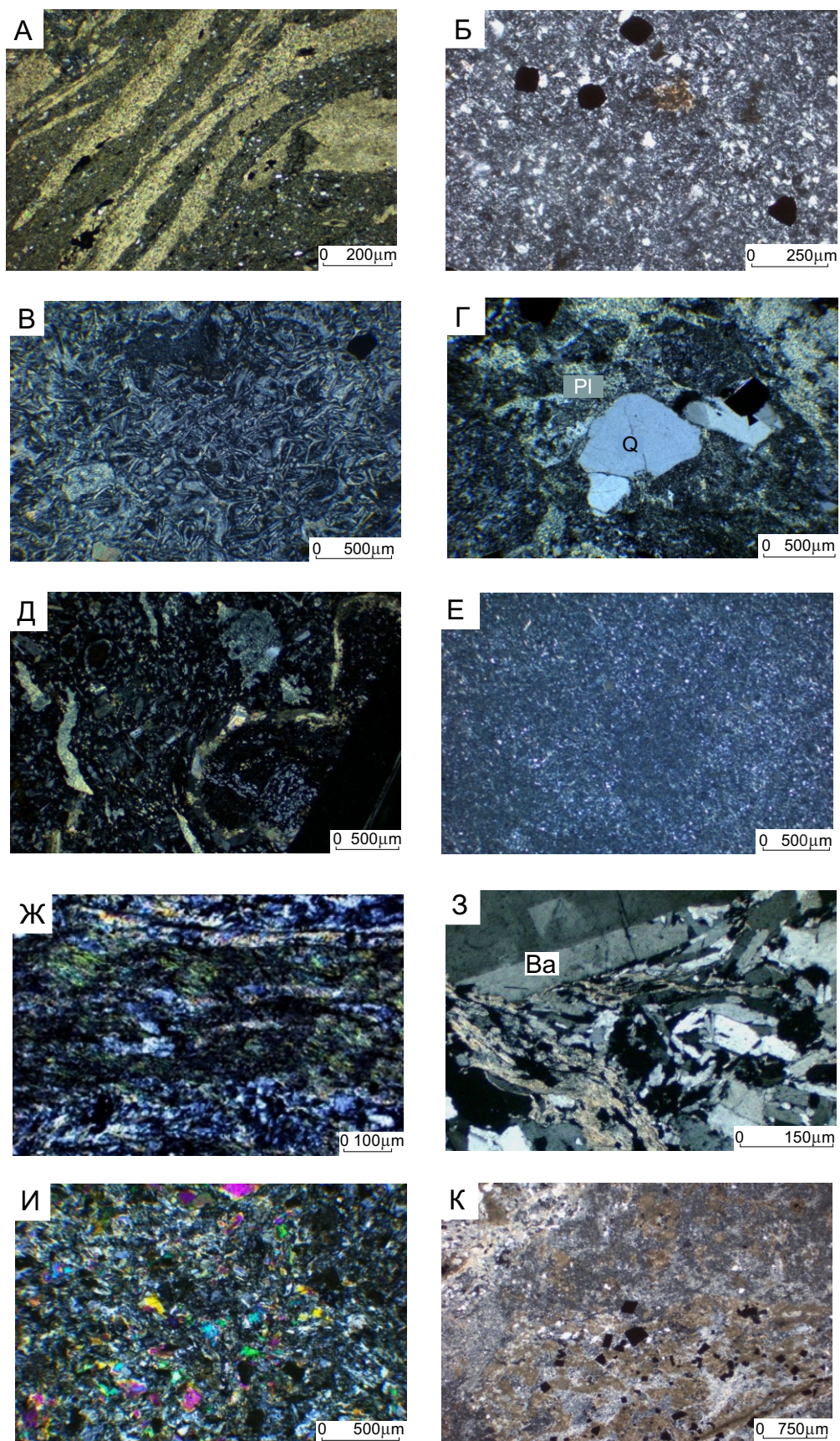
ники, а также углеродистые и кремнистые алевролиты. На Юбилейном месторождении значительную роль играют вулканогенно-осадочные брекчии. Особенностью Новозолотушинского месторождения является наличие в разрезе конгломератов и песчаников, что указывает на более выраженную терригенную составляющую. В строении Золотушинского месторождения принимают участие туфогенно-осадочные глинистые алевролиты, алевропелиты, туфы и лавобрекчии андезибазальтового состава.

Важным индикатором являются окolorудные изменения. Широко развиты гидротермально-метасоматические изменения, выраженные в образовании кварцитов, хлорит-карбонатных метасоматитов, баритизации, карбонатизации и хлоритизации.

Казахстанский Алтай. Прииртышский рудный район. Преобладающую роль в строении рудовмещающих толщ месторождений и рудопроявлений Прииртышского рудного района играют вулканогенно-осадочные образования, представленные чередованием метаморфизованных туфов, туффитов, алевролитов, аргиллитов, реже песчаников и известняков [5, 21, 26, 27, 41, 42]. Широко развиты породы кислого состава – риолиты, риодациты, их туфы и лавобрекчии, а также субвулканические тела (рис. 3).

Важная петрографическая особенность района – присутствие углеродисто-кремнистых и углеродисто-глинистых сланцев, которые служат основным рудовмещающим субстратом на Белоусовском и Березовском месторождениях. На Артемьевском месторождении рудные залежи локализованы в зоне контакта кремнистых алевролитов и туфов риолитового состава. В пределах Шемонаихинского месторождения широко развиты лавы и туфы риолитового состава, кремнистые алевролиты, а также андезибазальты. На Иртышском месторождении рудовмещающая толща сложена риолитами, риодацитами и андезитами, а также различными сланцами по алевролитам и туффитам. Вмещающие породы Белоусовского, Иртышского месторождений метаморфизованы в условиях зеленосланцевой фации регионального метаморфизма. Для Орловского месторождения характерно преобладание в разрезе алевролитов, часто кремнистых, с прослоями туфов и туффитов, реже – лав кислого состава. Помимо пород кислого состава, в ряде месторождений, таких как Орловское, Николаевское, Новоберезовское и

Начало рисунка 3



Продолжение рисунка 3

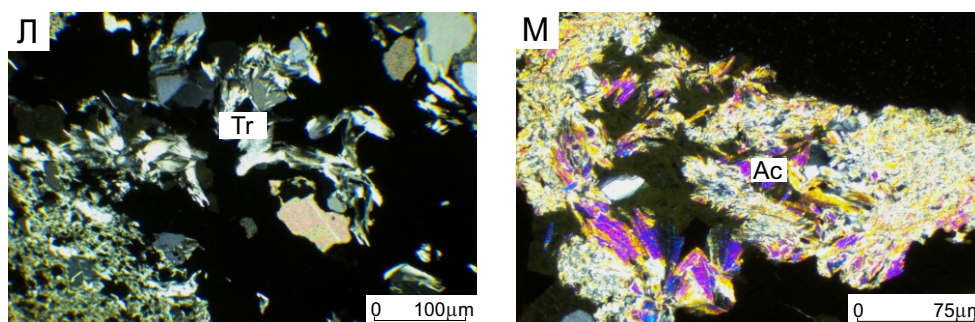


Рис. 3. Вулканогенно-осадочные породы Прииртышского, Лениногорского и Зырянского рудных районов:

А – известковистый алевролит (Тишинское месторождение); Б – кремнистый туффит с вкрапленностью пирита (Березовское месторождение); В – витрокластический туф риолитового состава (Шемонаихинское месторождение); Г – крупнопорфировый риолит с вкрапленниками кварца и разложившегося плагиоклаза (Греховское-2 месторождение); Д – миндалекаменный базальт (Новоберезовское месторождение); Е – ороговикоманный кремнистый аргиллит (Березовское месторождение); Ж – слюдисто-известковистый кварцсодержащий сланец по известковистому туфоалевролиту (Тишинское месторождение); З – баритовая порода, серицитсодержащая (Риддер-Сокольное месторождение); И – контактово-изменённый габбро-долерит (Шемонаихинское месторождение); К – серицит-карбонат-хлорит-кварцевый метасоматит с пиритом (Тишинское месторождение); Л – сноповидные выделения тремолита в сфалерит-пиритовой рудной массе (Зырянское месторождение); М – сноповидные выделения актинолита в серицит-хлоритовой массе (Зырянское месторождение); николи скрещены; минералы: Q – кварц, Pl – плагиоклаз, Ba – барит, Tr – тремолит, Ac – актинолит

Иртышское, отмечаются вулканы основного и среднего составов – андезиты, базальты, их туфы и лавобрекчии.

Повсеместно в пределах рудного района оруденение сопровождается интенсивными гидротермальными изменениями вмещающих пород, приведшими к формированию кварц-серицитовых, кварц-хлоритовых и серицит-хлоритовых метасоматитов.

Лениногорский рудный район. Петрографический состав вмещающих пород месторождений и рудопоявлений Лениногорского рудного района отличается значительным разнообразием, обусловленным сложной геологической историей и интенсивными магматическими и метасоматическими процессами [2, 8, 11–13, 15, 20, 26, 38, 40, 42, 51, 62]. В районе широко развиты вулканогенно-осадочные толщи, представленные риолитовыми, дацитовыми и андезитовыми лавами, лавобрекчиями, агломератовыми и кристаллокластическими туфами, а также алевролитами, аргиллитами и кварцитами (см. рис. 3).

Например, на Риддер-Сокольном, Ново-Лениногорском и Долинном месторождениях рудо-

вмещающие отложения представлены глинистыми, известково-кремнистыми алевролитами, лавобрекчиями, туфами и туффитами риолитового состава. Для Тишинского месторождения характерно наличие углеродисто-глинистых и известковистых алевролитов, туффитов и туфопесчаников, интенсивно расщепленных и превращённых в серицит-кварцевые метасоматиты. На месторождении Чекмарь рудовмещающими породами являются лавы, лавобрекчии и туфы риолитового состава с прослоями туфогенных алевролитов. Рудовмещающий разрез Гусяковского месторождения сложен преимущественно кремнистыми алевролитами, туфогенными алевролитами и песчаниками с линзами витрокластических туфов кислого состава. В пределах Юбилейно-Снегирихинского месторождения широко развиты туфы и лавобрекчии дацитового и андезибазальтового состава.

Петрографической особенностью рудного района является ассоциация рудных тел с породами, подвергшимися изменению с формированием барит-кварцевых, кварцевых, серицитовых, кварц-карбонат-хлоритовых и эпидот-хлорит-кварцевых

метасоматитов, образовавшихся за счёт интенсивного динамометаморфизма исходных вулканогенно-осадочных образований.

Зыряновский рудный район. В пределах месторождений и рудопроявлений Зыряновского рудного района рудовмещающие толщи представлены переслаиванием риодацитовых и андезибазальтовых лав, их туфов, туфопесчаников, алевролитов и известняков, подвергшихся интенсивным процессам гидротермального и метаморфического преобразования [28, 41, 43, 56, 59, 60] (см. рис. 3).

Например, на Зыряновском месторождении широко развиты метасоматически изменённые породы, преобразованные в кварц-хлорит-карбонат-серицитовые сланцы, которые формируют протяжённые пластообразные зоны с раздувами и пережимами. На месторождениях Греховское-I и -II вмещающими породами являются глинистые и известковистые алевролиты, часто переслаивающиеся с туффитами и песчаниками, которые подверглись динамометаморфизму. Рудовмещающими породами Малеевского месторождения являются кремнистые алевролиты, кварциты, брекчии риолитового состава. Здесь же отмечаются ороговикованные породы с биотитом, кордиеритом и андалузитом.

Особенностью всех месторождений является асимметричное развитие метасоматических ореолов, преимущественно с лежащих боков рудных тел, где мощность зон изменений может достигать первых сотен метров.

Китайский Алтай. Рудный район Ашеле. На основании петрографических исследований месторождений рудного района Ашеле выделен комплекс вулканогенно-осадочных пород, ассоциирующих с полиметаллическим оруденением [66, 73, 79, 81, 83, 84, 89, 90, 91, 95, 96] (рис. 4).

Например, на месторождении Ашеле широко распространены лавы, лавобрекчии, туфы риолитового, дацитового и базальтового состава, которые смяты в складки. На месторождении Сарсук ключевую роль играют туфы, лавобрекчии риолитового и андезитового состава. Вмещающие породы месторождения Кейнбулейк сильно изменены и представлены биотит-кварцевыми сланцами, метакварцитами и метапесчаниками.

Также выявлено широкое развитие гидротермальных изменений, таких как аргиллизация, окварцевание, серицитизация, хлоритизация, карбонатизация и эпидотизация, которые оказали значительное влияние на первичный минеральный

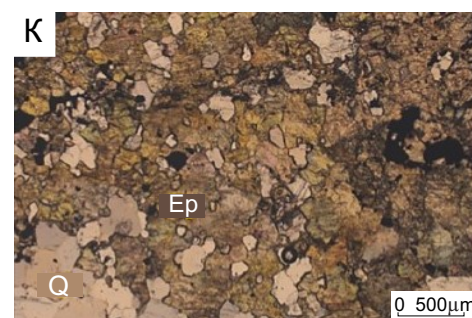
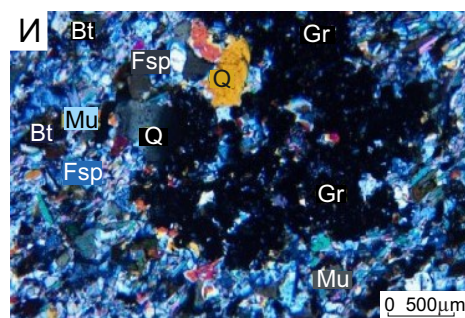
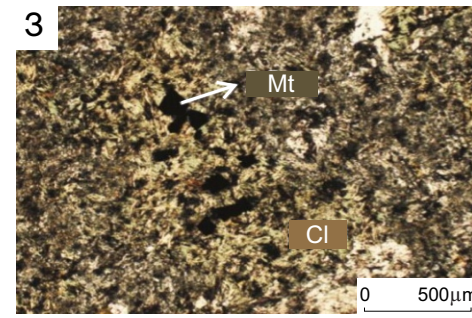
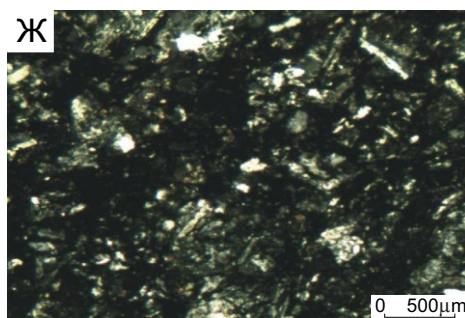
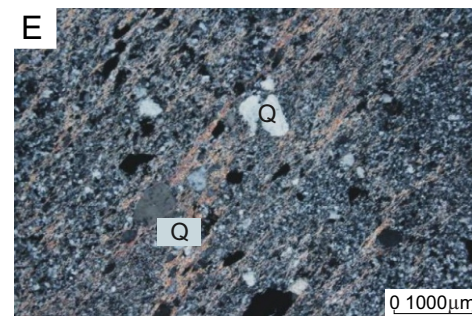
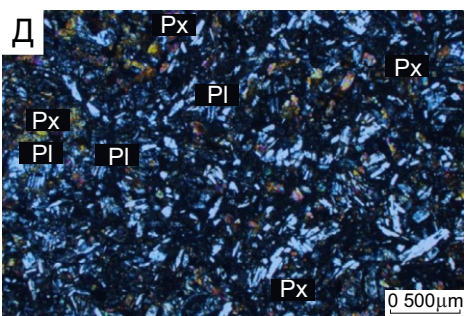
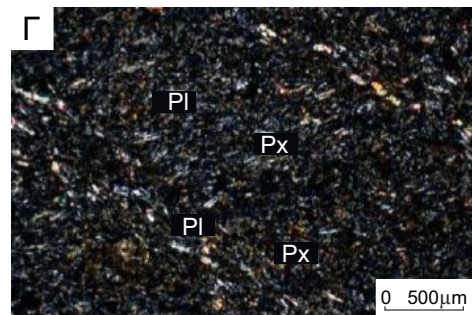
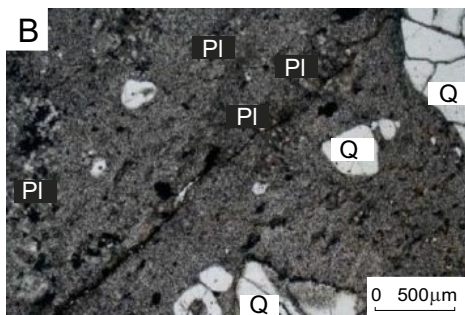
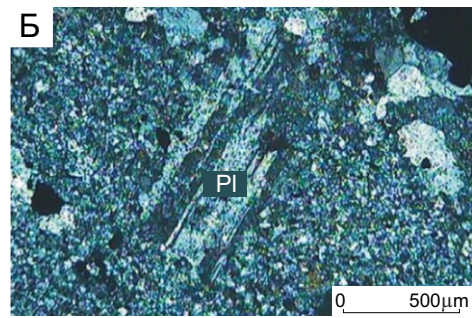
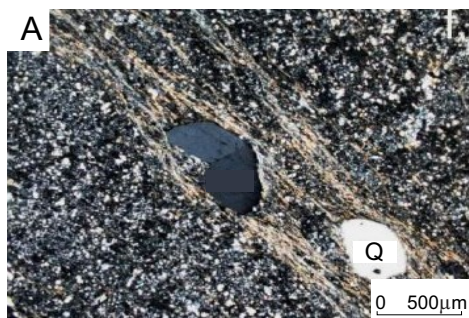
состав пород. Особенностью месторождения Сарсук является тесная связь оруденения с хлоритом, который образует вермикулярные, веерообразные и неправильные формы.

Рудный район Келан. На месторождениях рудного района Келан вмещающие породы подверглись интенсивным преобразованиям: окварцеванию, хлоритизации, карбонатизации, грейзенизации, эпидотизации, актинолитизации, биотитизации и скарнированию, которые привели к образованию скарнов, богатых гранатом (преимущественно альмандин-спессартинового состава) [63, 64, 67, 70, 80, 85, 92–94, 97] (см. рис. 4).

Например, петрографические исследования на месторождении Абагонг выявили метариолиты с бластопорфировой и бласториотакситовой структурой, содержащие вкрапленники калиевого полевого шпата, плагиоклаза и кварца в мелкозернистой массе рекристаллизованного стекла, что свидетельствует о вулканогенной природе протолита и последующем низкотемпературном метаморфизме в условиях зеленосланцевой фации. В строении рудовмещающей толщи месторождения Талате отмечаются метатифы, метавулканические брекчии, метариолиты, а также широко развиты скарны, сложенные в основном гранатами альмандин-спессартинового ряда, а также амфиболом, хлоритом и эпидотом. На месторождении Дадонгу развитие полиметаллической минерализации сопровождается образованием комплекса метасоматитов, включающего серицит, биотит, эпидот, гранат и хлорит. На месторождениях Темирт и Вуласигу вмещающие породы представлены хлорит-кварцевыми сланцами, известняками, мраморами, метариолитами, метапесчаниками, туфами, несущими следы многократной перекристаллизации и милонитизации.

Рудный район Майзи. Основными породами, вмещающими оруденение, в пределах рудного района Майзи, являются метаморфизованные вулканогенно-осадочные образования, среди которых ключевую роль играют лавы, туфы риолитового, риодацитового и дацитового состава, туфопесчаники, известняки, а также гранат-биотитовые и биотит-кварцевые сланцы, развивающиеся по туфоалевролитам [72, 76, 77] (см. рис. 4).

На месторождении Кекетале рудовмещающий разрез представлен метатифами, метариолитами, метаалевролитами, мраморами, а также биотитовыми и гранат-биотитовыми сланцами, которые имеют порфиروبластовую структуру с гранатом



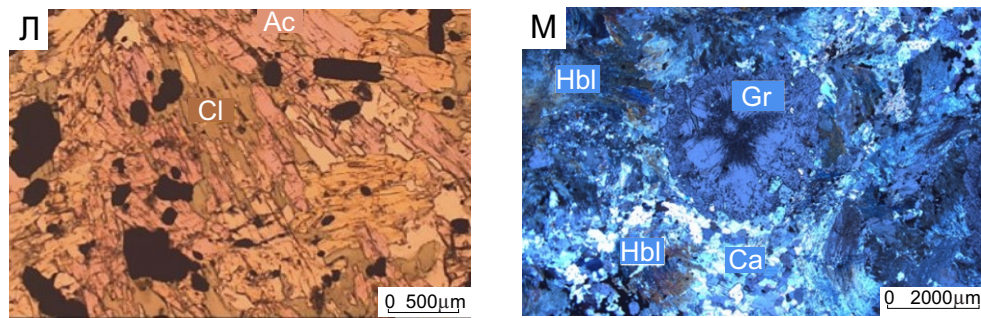


Рис. 4. Вулканогенно-осадочные породы рудных районов Ашеле, Келан и Майзи. С использованием материалов [64, 73, 76, 83, 84, 89, 90]:

А – риолит (месторождение Ашеле); Б – изменённый риолит с субгедральными пластинчатыми вкрапленниками плагиоклаза (месторождение Абагонг); В – дацит (месторождение Ашеле); Г – андезибазальт (месторождение Ашеле); Д – базальт (месторождение Ашеле); Е – крупновкрапленный риолит (месторождение Сарсук); Ж – габбро-долерит (месторождение Сарсук); З – хлоритолит с магнетитом (месторождение Сарсук); И – гранат-биотитовый сланец (по туфоалевролиту?) (месторождение Кекетале); К – кварц-эпидотовый скарн (месторождение Талате); Л – актинолит-хлоритовый скарн (месторождение Талате); М – гранат-амфиболовый (роговообманковый) скарн (месторождение Савуси); николи скрещены; минералы: Q – кварц, Pl – плагиоклаз, Px – пироксен, Mt – магнетит, Cl – хлорит, Bt – биотит, Mu – мусковит, Fsp – полевошпат, Gr – гранат, Ep – эпидот, Ac – актинолит, Hbl – роговая обманка, Ca – карбонат (кальцит)

и кварцем в основной массе, сложенной кварцем, плагиоклазом, биотитом, мусковитом, апатитом и цирконом. На месторождении Савуси вмещающими породами являются кристаллические туфы и брекчированные лавы риолитового состава, а также скарны. В процессе скарнирования происходят значительные изменения: туфы преобразуются в гранат-биотитовые скарны, а карбонатные разности – в грюнеритовые скарны по конгломератам и песчаникам, что указывает на более выраженную терригенную составляющую.

Минеральный состав руд. Изучение минерального состава руд является важной основой для понимания генезиса, условий формирования и пространственно-временной эволюции полиметаллического оруденения в пределах Рудноалтайской зоны. В настоящей работе обобщены результаты комплексных минералогических исследований, основанные на анализе обширного фонда литературных источников, архивных материалов, а также данных, полученных в ходе собственных полевых и лабораторных работ.

На основе этого анализа в пределах медно-свинцово-цинково-колчеданной рудной формации были выделены четыре минеральных типа колчеданно-полиметаллических месторождений:

1) галенит-сфалерит-баритовый (месторождения Зареченское, Змеиногорское, Стрижковское, Белоусовское, Риддер-Сокольное, Новоленинское, Долинное);

2) галенит-сфалеритовый пиритсодержащий (месторождения Среднее, Семеновское, Майское, Таловское, Степное, Зыряновское, Греховское-I и -II, Снегиревское, Дадонггу, Талате, Абагонг);

3) халькопирит-галенит-сфалерит-пиритовый (месторождения Корбалихинское, Рубцовское, Захаровское, Западно-Захаровское, Юбилейное, Новозолотушинское, Тишинское, Чекмарь, Гуляковское, Белоусовское, Березовское, Артемьевское, Камышинское, Шемонаихинское, Малеевское, Путинцевское, Кейнбулейк, Вуласигу, Темирт, Кьяксия, Савуси);

4) (галенит)-халькопирит-сфалерит-пиритовый (месторождения Лазурское, Золотушинское, Анисимов Ключ, Шубинское, Снегирихинское, Новоберезовское, Иртышское, Николаевское, Орловское, Ашеле, Сарсук).

Привлечение значительного массива информации по месторождениям и рудопроявлениям российской, казахстанской и китайской частей Большого Алтая позволило провести сравнительный анализ и выявить как общие закономерности, так

и специфические черты минералообразования в различных рудных районах. Особое внимание уделено вариациям соотношений основных рудных минералов, текстурно-структурным особенностям руд и наличию редких и благородных металлов.

Российский Алтай. Змеиногорский рудный район. Для всех месторождений (Корбалихинское, Зареченское, Среднее, Змеиногорское, Лазурское, Семеновское, Майское, Стрижковское) и рудопроявлений (Петровское, Карамышевское, Преображенское, Тушканихинское, Хлебниковское, Отраднинское, Давыдовское, Титовско-Харьковское, Вересухинское, Сосновское, Зайцевское, Белоглинское, Головинско-Ганьковское, Привет) Змеиногорского рудного района характерна ведущая роль сульфидной минерализации, однако наблюдаются вариации в соотношениях основных рудных минералов и по наличию специфических компонентов [9, 17, 25, 30, 31, 39, 42, 46, 47, 48]. Практически повсеместно доминирует пирит, содержание которого в рудах варьируется. Наряду с пиритом основными рудообразующими сульфидами являются сфалерит и галенит, а в качестве постоянного, но менее распространённого минерала, присутствует халькопирит (рис. 5).

На Зареченском и Среднем месторождениях наблюдается также существенная баритовая минерализация, формирующая золото-серебросодержащий барит-полиметаллический тип руд, где барит может составлять до 90 % объёма рудных тел, а в составе руд устанавливаются самородное золото, электрум и аргентит. Для руд Майского месторождения характерными особенностями являются присутствие магнетита, гематита, пирротина, блёклых руд и халькозина, а также развитие жильной кварц-карбонатной минерализации с хлоритом. Второстепенными, но диагностически важными минералами на ряде объектов являются борнит и блёклые руды.

Тектурно-структурные особенности руд достаточно разнообразны и включают массивные, вкрапленные, прожилково-вкрапленные, полосчатые и брекчиевидные текстуры. На Корбалихинском месторождении дополнительно отмечаются ритмично-слоистые и линзовидно-слоистые текстуры. Рудные тела преимущественно пластовой, линзовидной и жилообразной морфологии, залегают согласно с вмещающими толщами.

Рубцовский рудный район. Руды месторождений Рубцовского рудного района (Рубцовское,

Степное, Таловское, Захаровское, Западно-Захаровское) и рудопроявлений (Склюихинское, Матаевское, Бобковское, Северо-Западное) характеризуются ведущей ролью сульфидных минералов, среди которых преобладает сфалерит, составляющий в среднем 40–50 % от рудной массы [17, 30–32, 45, 42, 45] (см. рис. 5). Вторым по значимости является галенит, содержание которого варьирует от 10–15 до 20–25 % на различных объектах. Сульфиды меди представлены в основном халькопиритом (5–15 %), а также блёклыми рудами, отмечаемыми, в частности, на Рубцовском месторождении. Пирит – постоянный и широко распространённый минерал, его содержание обычно составляет 10–15 %, а в зонах слабой минерализации может достигать 70–90 %. На Степном месторождении присутствует пирротин (около 5 %), что указывает на некоторые вариации в сульфидной ассоциации.

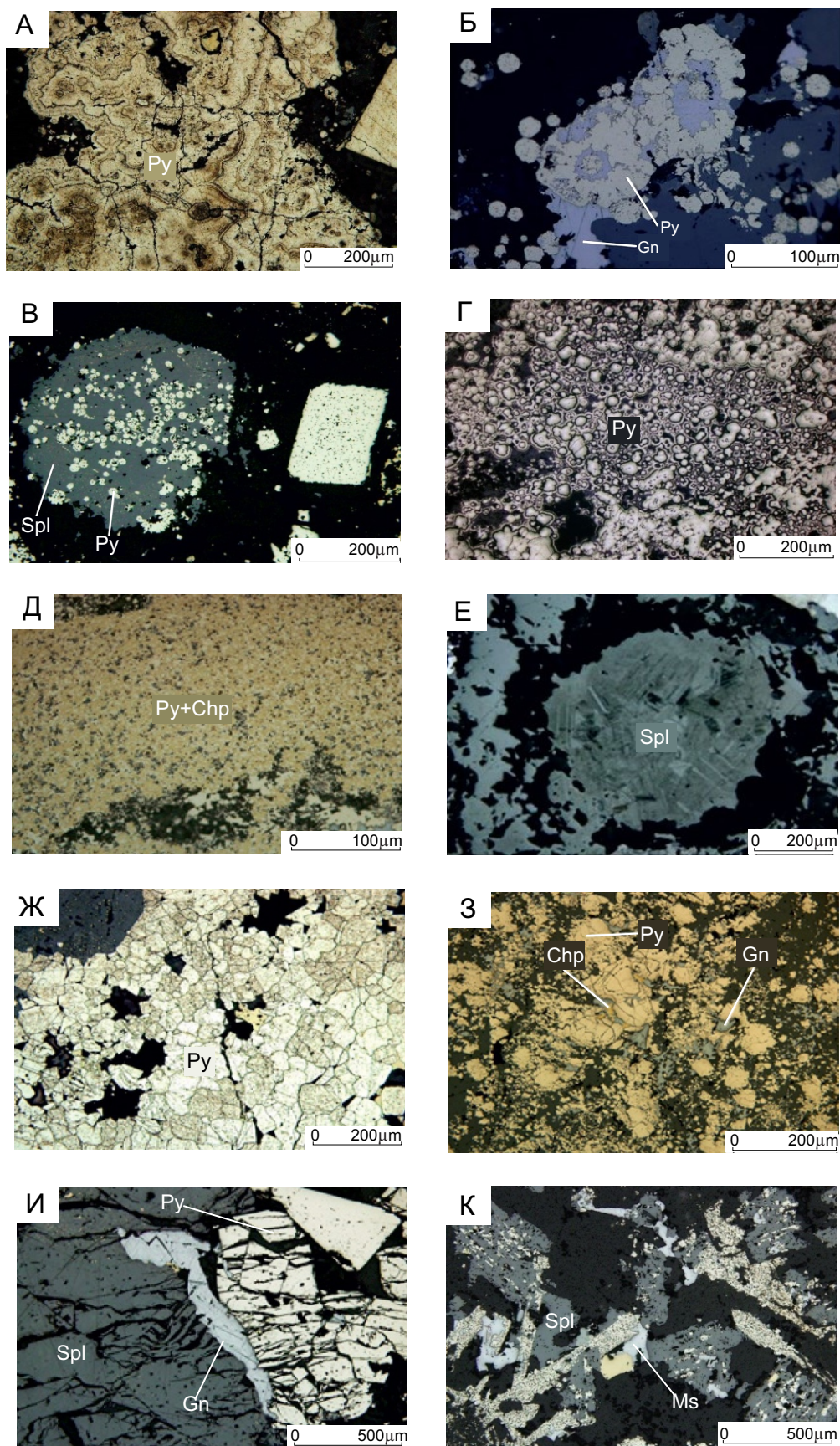
Особого внимания заслуживают специфические минеральные ассоциации, выделяющие отдельные месторождения. На Рубцовском месторождении отмечается блёкловорудно-сфалерит-пирит-халькопирит-галенитовая ассоциация с золотом. Для Таловского месторождения характерна барит-полиметаллическая минерализация. На Степном месторождении зафиксирована ассоциация с пирротинном.

Среди текстур руд преобладают массивные, прожилково-вкрапленные и гнездово-вкрапленные, что типично для стратиформных залежей. Для Захаровского месторождения характерны прожилково-вкрапленные и гнездово-вкрапленные текстуры, тогда как для Рубцовского более типичны массивные текстуры.

Рудные тела на Степном и Таловском месторождениях имеют тонко- и мелкозернистые структуры. Важной особенностью является развитие зоны гипергенеза, прослеживающейся до глубин 100–150 м. В её пределах формируются окисленные руды, минеральный состав которых существенно отличается. Для окисленных свинцовых руд характерны церуссит, англезит, плюмбоярозит и гидрогетит. В окисленных медных рудах преобладают халькозин, куприт, малахит и азурит. На Таловском месторождении зона гипергенеза развита слабо и представлена в основном гнёздами плюмбоярозита.

Золотушинский рудный район. Главными рудными минералами месторождений Золотушинского рудного района (Золотушинское, Ново-Зо-

Начало рисунка 5



Продолжение рисунка 5

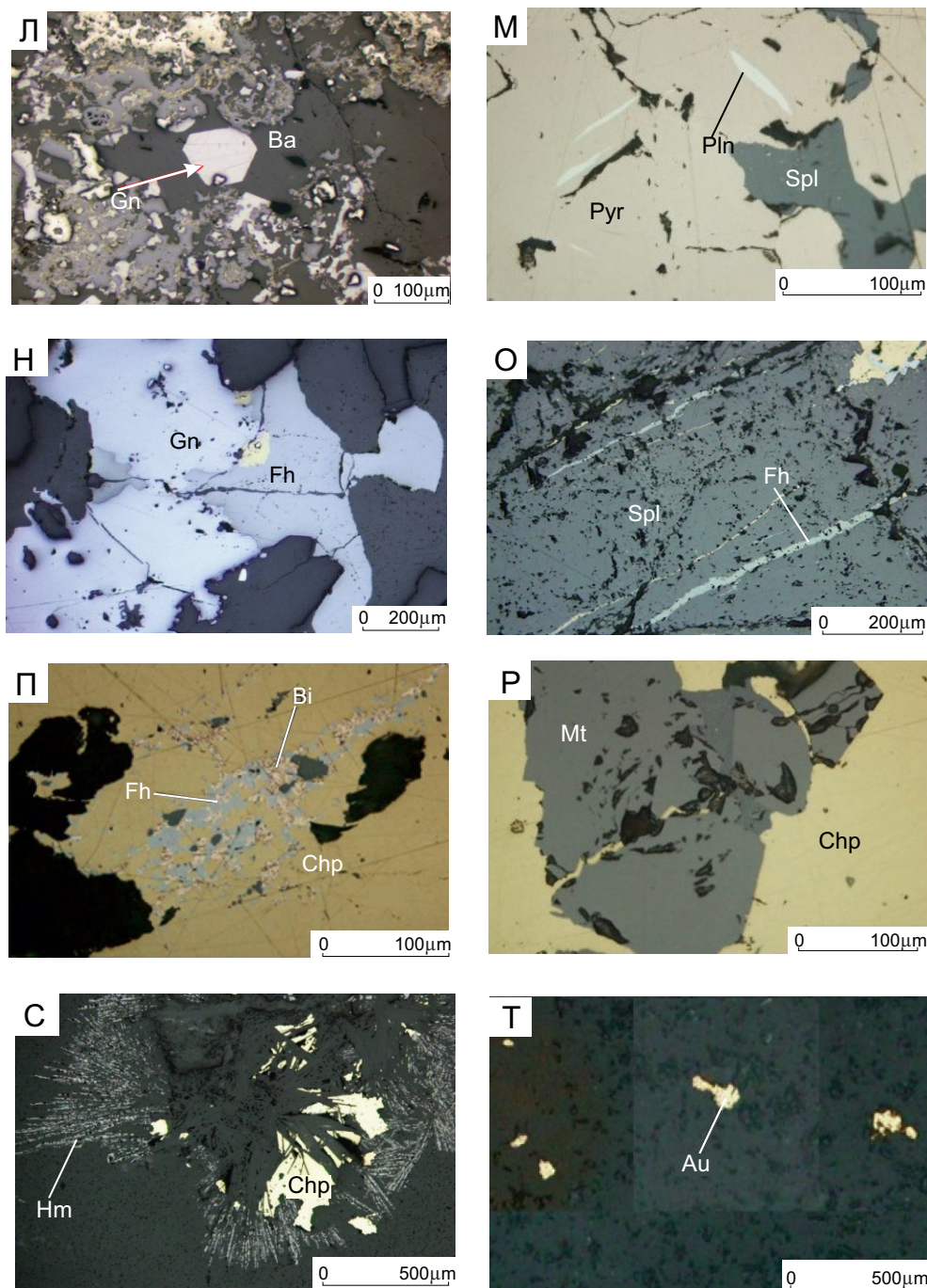


Рис. 5. Минеральный состав руд Змеиногорского и Рубцовского рудных районов. С использованием материалов [30, 32, 47, 48]:

А – зональные почки пирита (Корбалихинское месторождение, протравлено); Б – первичные почки пирит-галенитового состава (в центре почки фрамбоид) окружены пиритовыми фрамбоидами (Семеновское месторождение); В – фрамбоиды пирита в сфалерите (Корбалихинское месторождение); Г – ажурный агрегат колломорфного пирита в цементе брекчий (Западно-Захаровское месторождение); Д – тонкозернистый пирит-халькопиритовый агрегат (Корбалихинское месторождение); Е – сфалерит двойникового строения (Корбалихинское месторождение); Ж – пирит гранобластовой структуры (Майское месторождение); З – перекристаллизованный пирит с сохранившимся реликтовым концентрически-зональным строением (Лазурское месторождение); И – интенсивное дробление

бление минералов ранней генерации (пирита и сфалерита), цементация их более поздним галенитом (Майское месторождение); К – выделения марказита вдоль двойниковых швов в сфалерите, которые придают сфалериту характерный облик (Западно-Захаровское месторождение); Л – идиоморфный кристалл галенита в барите (показан стрелкой) (Западно-Захаровское месторождение); М – пламенеvidный восток пентландита в пирротине (Сосновское рудопроявление); Н – выделения блёклой руды на контакте с галенитом (Тушканихинское рудопроявление); О – трещины в сфалерите выполнены блёклыми рудами (Зайцевское рудопроявление); П – выделения блёклой руды и самородного висмута в халькопирите (Вересухинское рудопроявление); Р – изометричные выделения магнетита в халькопирите (Сосновское рудопроявление); С – гематит нарастает внутрь выделений кварца вдоль контакта кварца и хлорита (Сосновское рудопроявление); Т – выделения самородного золота (Змеиногорское месторождение); минералы: Py – пирит, Gn – галенит, Spl – сфалерит, Chp – халькопирит, Ms – марказит, Ba – барит, Prg – пирротин, Pln – пентландит, Fh – блёклая руда, Bi – самородный висмут, Mt – магнетит, Hm – гематит, Au – самородное золото

лотушинское, Юбилейное) и рудопроявлений (Локтевское, Ремовское, Николаевское, Каменское, Александровское, Титовское, Гериховское, Голодаевское, Искровское, Сургутановское, Новенькое, Северо-Золотушинское, Успенское, Масальское, Казарменное) выступают сульфиды: пирит, сфалерит, галенит и халькопирит [17, 30, 42]. При этом наблюдаются различия в их количественных соотношениях. Для Юбилейного месторождения содержания составляют (в %): пирита – около 20, сфалерита – 20–40, галенита – 10–15, халькопирита – 10–15. Помимо преобладающего колчеданно-полиметаллического типа руд на Юбилейном месторождении (70 %), присутствуют полиметаллические, барит-полиметаллические, а на Новозолотушинском также выделяются колчеданно-медно-цинковые, колчеданно-свинцово-цинковые и медноколчеданные разности.

По текстурно-структурным особенностям руды характеризуются значительным разнообразием, включая массивные, брекчиевые, полосчатослоистые, прожилково-вкрапленные и слоистые текстуры. Морфология рудных тел преимущественно линзовидная и пластообразная, залегающие субсогласно с вмещающими породами.

Казахстанский Алтай. Прииртышский рудный район. Основу рудной минерализации Прииртышского рудного района (Орловское, Артемьевское, Николаевское, Березовское, Новоберезовское, Иртышское, Белоусовское, Камышинское) повсеместно составляют сульфиды: пирит, сфалерит, галенит и халькопирит, которые формируют массивные, вкрапленные, прожилково-вкрапленные и полосчатые текстуры [21, 26, 27, 41, 42] (рис. 6).

На Белоусовском месторождении руды характеризуются присутствием барита, где его содер-

жание достигает 5 %, а также отмечается повышенная концентрация свинца и цинка. Здесь же встречаются блёклые руды, арсенопирит, пирротин, а из редких минералов установлены самородное золото, электрум, висмутин и алтаит. На Артемьевском месторождении выявлены две полярные минеральные ассоциации: свинцово-цинковая с благородными металлами, баритом, кадмием, сурьмой и мышьяком висячем боку и медно-висмутовая с пиритом – в лежащем. Кроме того, в рудах отмечаются пирротин, марказит, борнит, халькозин, арсенопирит, а также микроскопические включения золота и серебра. Для Березовского и Новоберезовского месторождений характерна ассоциация пирита, сфалерита, халькопирита и галенита с повышенным содержанием блёклых руд. На Иртышском месторождении, помимо основных сульфидов, значительную роль играют блёклые руды, тетраэдрит, фрейбергит, теннантит. В свою очередь, Николаевское месторождение отличается резким преобладанием меди и цинка над свинцом, а в минеральном составе наряду с халькопиритом и сфалеритом присутствуют вюртцит, борнит, халькозин и ковеллин. Отличительной чертой Орловского месторождения является развитие флюорита в числе главных нерудных минералов. В рудах отмечаются магнетит, арсенопирит, а также самородное золото.

Лениногорский рудный район. Основу рудного вещества всех месторождений Лениногорского рудного района (Риддер-Сокольное, Тишинское, Чекмарь, Ново-Лениногорское, Долинное, Шубинское, Юбилейно-Снегирихинское, Гусяковское, Анисимов Ключ) составляют сульфиды – сфалерит, галенит, халькопирит и пирит, которые формируют прожилково-вкрапленные, массивные, полосчатые и брекчиевидные текстуры [7, 11–13, 15, 16, 22, 26, 35, 37, 42, 44, 51, 53, 54, 62]

(см. рис. 6). На всех месторождениях наблюдается устойчивый парагенезис этих минералов, однако их количественные соотношения и морфология рудных тел варьируют.

Риддер-Сокольное месторождение, являясь уникальным, характеризуется сложным составом руд с высокими содержаниями золота и серебра. На этом месторождении установлено до ста минеральных типов руд. Сфалерит является наиболее распространённым сульфидом, содержит примеси железа, кадмия, висмута, селена и теллура. Галенит – главный носитель серебра (0,01–0,29 %) – также обогащён висмутом, селеном и теллуrom. Халькопирит содержит висмут, селен, теллур, серебро, а в медных рудах – ещё молибден, индий и золото. Золото встречается во всех типах руд, но больше всего концентрируется в барит-полиметаллических разностях и малосульфидных кварцевых жилах.

Аналогичный минеральный комплекс, но с вариациями соотношений, наблюдается и на других месторождениях района. Новоленинское месторождение характеризуется развитием барит-полиметаллических и колчеданно-медно-цинковых руд, где отмечается повышенная роль барита и золота. Текстуры руд варьируют от массивных брекчиевидных до прожилково-вкрапленных разностей. Для руд этого объекта типичны ассоциации с теллуридами и сульфосолями серебра и висмута, а золото встречается как в самородном виде, так и в форме электрума. На Тишинском месторождении преобладают прожилково-вкрапленные руды, для которых характерно повышенное содержание цинка и наличие в качестве второстепенных минералов блёклых руд, пирротина и арсенопирита. Минеральный состав месторождения Чекмарь включает, помимо основных сульфидов, барит, блёклые руды, арсенопирит, а также самородное золото и серебро в виде редких включений. Гусяковское месторождение сложено прожилково-вкрапленными, реже массивными рудами, с главными рудными минералами – сфалеритом, галенитом, халькопиритом и пиритом. Руды Юбилейно-Снегирихинского месторождения сплошные, вкрапленные и представлены пиритом, халькопиритом, сфалеритом, в меньшей степени галенитом, блёклой рудой, пирротинном, марказитом, магнетитом, ильменитом, а также арсенопиритом.

Зыряновский рудный район. Оруденение месторождений Зыряновского рудного района (Зыря-

новское, Малеевское, Греховское, Путинцевское, Снегиревское) представлено сульфидами, среди которых доминируют сфалерит, галенит, халькопирит и пирит [26, 28, 41, 42, 43, 44, 59, 60] (см. рис. 6).

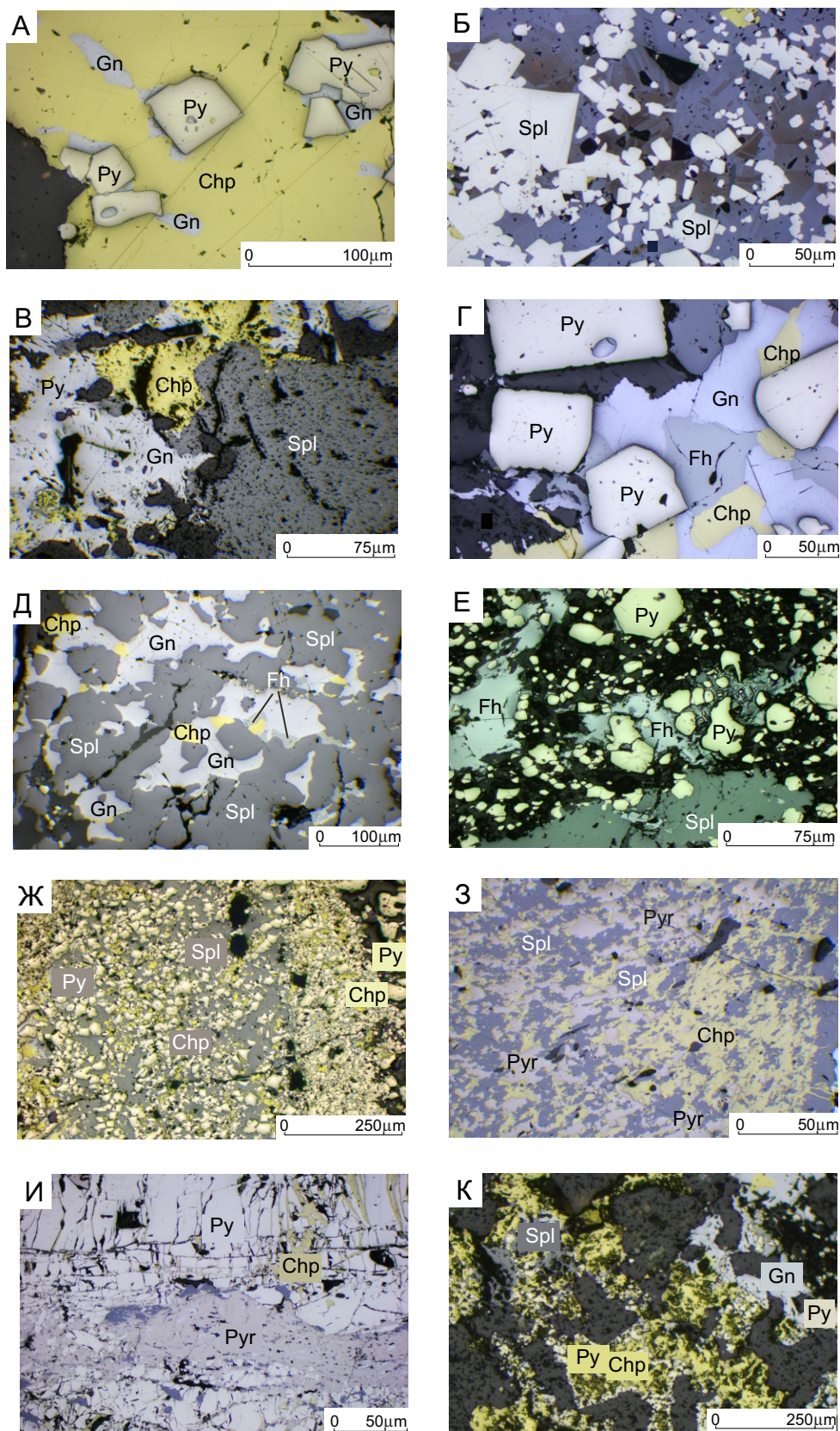
Например, на Зыряновском месторождении сфалерит составляет до 45 % массы руд, значительную роль играют барит (5 %), а также комплекс второстепенных и редких минералов, таких как теннантит, тетраэдрит, фрейбергит, марказит, молибденит, арсенопирит, пирротин, магнетит, электрум и самородное золото. Минеральный состав месторождений Греховское-I, Греховское-II, Снегиревское отличается меньшим содержанием меди и более высокой долей свинца и цинка. Среди рудных минералов, помимо основных сульфидов, отмечаются блёклые руды, арсенопирит, кубанит, а также редкие минералы золота и серебра – акантит, электрум, велерит, калаверит. На Малеевском месторождении наблюдается вертикальная минералогическая зональность: в верхних частях рудных тел преобладают барит-полиметаллические руды, которые с глубиной сменяются цинковыми, медно-цинковыми и серно-колчеданными разностями.

Попутными компонентами руд всех месторождений являются благородные металлы (золото, серебро), а также редкие и рассеянные элементы – кадмий, ртуть, висмут, молибден, кобальт, мышьяк, сурьма, селен, таллий, теллур, галлий, индий, германий и никель. Их носителями служат сульфидные минералы, в которых они находятся в виде тонких примесей или микровключений.

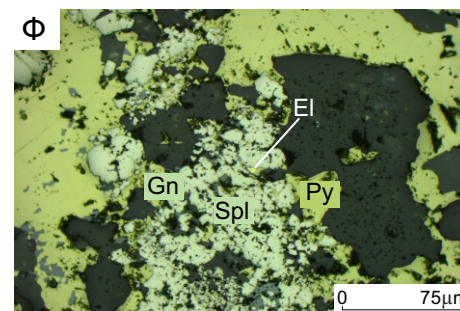
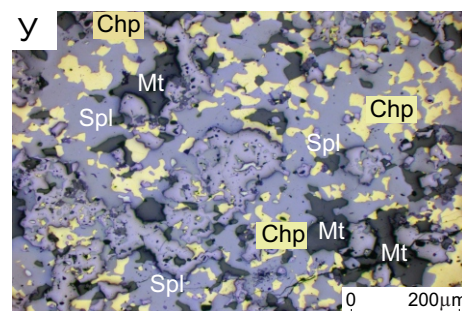
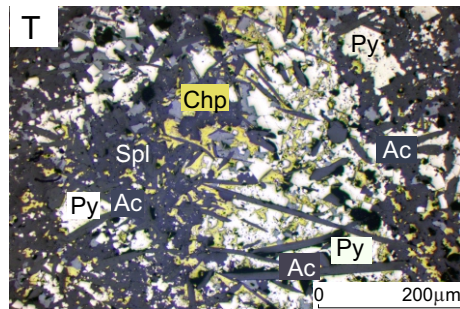
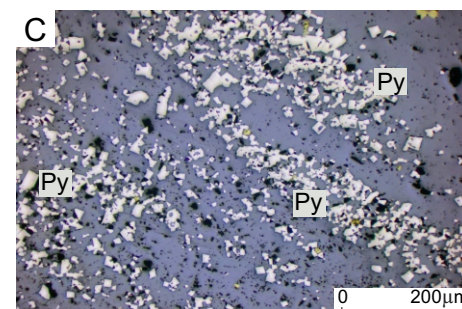
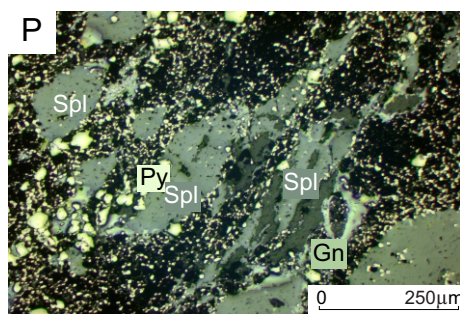
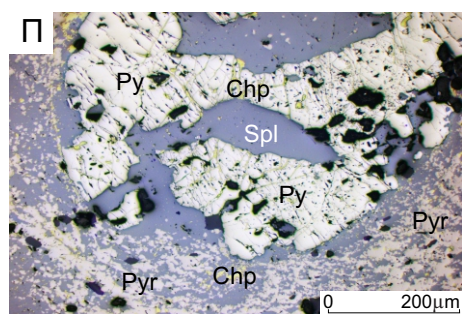
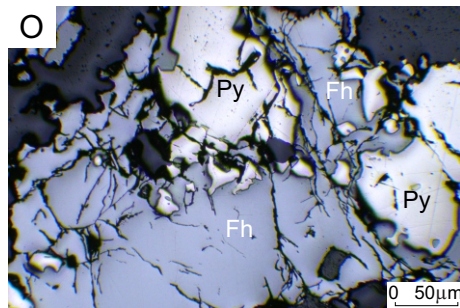
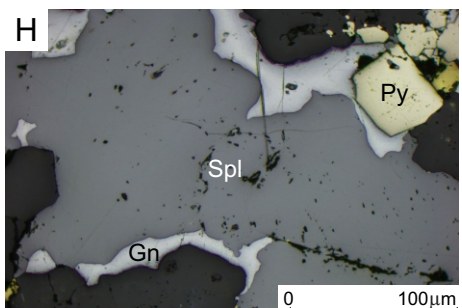
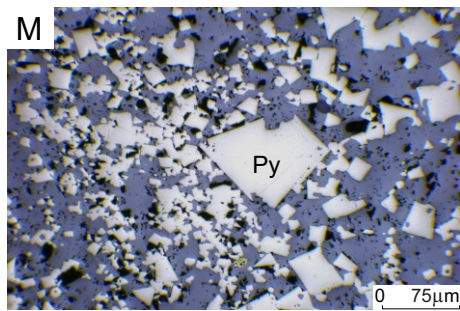
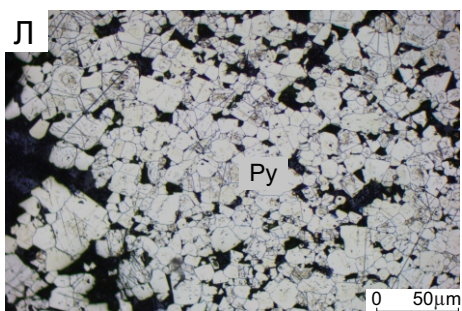
Китайский Алтай. Рудный район Ашеле. Месторождения рудного района Ашеле (Ашеле, Сарсук, Кейнбулейк) характеризуются как объекты, которые, сохраняя общие черты колчеданно-полиметаллического оруденения, отличаются выраженной многостадийностью формирования, сильным влиянием тектоно-метаморфических процессов, что отражается в широком развитии катакластических, метасоматических и реликтовых текстур [66, 84, 87–89, 91, 95, 96] (рис. 7).

Минеральный состав месторождения Ашеле представлен пиритом, халькопиритом, сфалеритом, галенитом и тетраэдритом. Для руд характерно большое разнообразие структур (массивные, полосчатые, прожилково-вкрапленные, жильные) и текстур (идиоморфнозернистые, гипидиоморфнозернистые, катакластические, интерстициальные).

Начало рисунка 6



Продолжение рисунка 6



Минерализация месторождения Сарсук представлена комплексом сульфидов: пиритом, халькопиритом, сфалеритом и галенитом с подчинённым количеством ковеллина, арсенопирита, борнита и самородного золота. Минеральные ассоциации меняются с глубиной: от Au и Cu-Au к Cu-Pb-Zn. Оруденение на месторождении выявлено в виде вкрапленности, штокверков и жил, при этом сохранились реликты стратиформных массивных и полосчатых руд. Текстуры аналогичны таковым на месторождении Ашеле. На месторождении Кейнбулейк выявлены два основных типа руд: стратиформные слоистые рудные тела (массивные, густовкрапленные и с мелкополосчатыми сульфидами), в которых преобладают сфалерит-халькопиритовые ассоциации с примесью пирротина и магнетита; а также жильные цинково-свинцовые руды, состоящие из сфалерита и галенита. Пирит встречается повсеместно в обоих типах руд. Структуры руд разнообразны: вкрапленные, прожилково-вкрапленные, массивные, полосчатые, с характерными аллотриоморфно-зернистыми, лепидогранобластовыми и реликтовыми текстурами.

Рудный район Келан. Минерализация месторождений рудного района Келан (Дадонггу, Та-

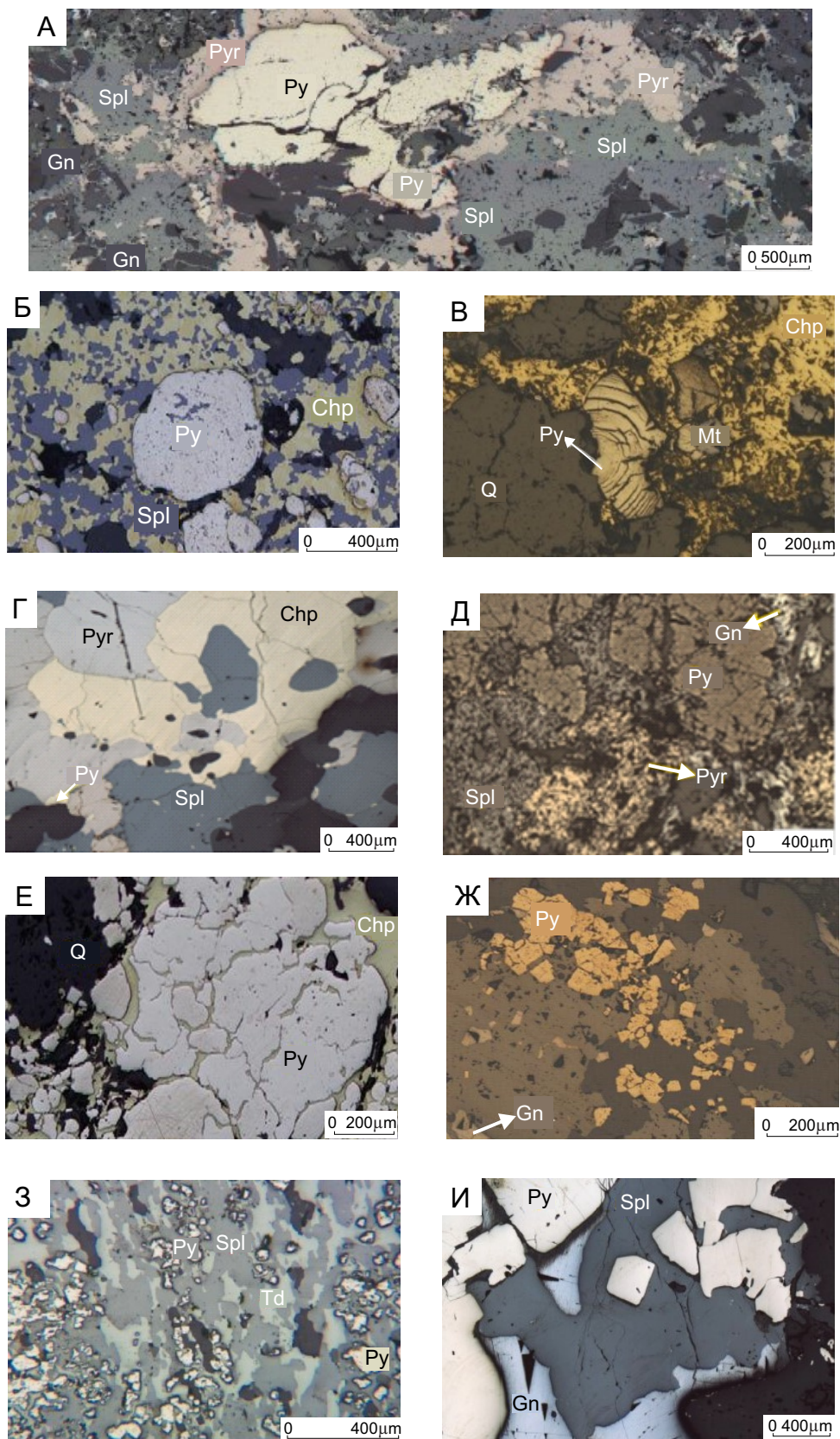
лате, Темирт, Вуласигу, Кьяксия и Абагонг) тесно связана с интенсивными и разнообразными процессами изменения вмещающих пород [63, 67, 85, 90, 92, 93, 97, 90, 94] (см. рис. 7).

На месторождении Талате рудные залежи имеют пластовую, линзовидную и жильную формы. Основные типы руд – свинцово-цинковые и полиметаллические. Текстуры руд – массивные, прожилковые, вкрапленные, полосчатые, пластинчатые, рассеянные и брекчиевидные. Главные рудные минералы – пирит, сфалерит, галенит, магнетит, гематит, реже халькопирит, пирротин, арсенопирит и молибденит. Для руд месторождения Темирт характерны полосчатые, вкрапленные и массивные текстуры. На месторождении Вуласигу выделены пирит-магнетитовый, пирит-сфалерит-магнетитовый и пирит-халькопирит-золотой типы руд. Рудные тела имеют прожилково-вкрапленную, массивную и брекчиевидную структуры. Наблюдаются разнообразные текстуры руд: метасоматические, колломорфные, катакластические. Окисленные руды характеризуются повышенными содержаниями золота.

Рудный район Майзи. Для месторождений рудного района Майзи (Кекетале, Савуси, Дадонггу, Акехарен) также характерна многостадий-

Рис. 6. Минеральный состав руд Прииртышского, Лениногорского, Зыряновского рудных районов:

А – идиоморфные кристаллы пирита развиваются в галенит-халькопиритовом агрегате (Зыряновское месторождение); Б – двойниковое строение сфалерита (Малеевское месторождение); В – гнезда пирит-халькопирит-галенит-сфалеритового состава (Риддер-Сокольное месторождение); Г – гипидиоморфные зёрна пирита цементируются галенитом, блёклой рудой и халькопиритом (Греховское-2 месторождение); Д – в интерстициях сфалерита развиваются галенит, блёклая руда и халькопирит (Шемонаихинское месторождение); Е – блёклая руда и сфалерит цементируют пирит (Артемьевское месторождение); Ж – фрагмент полосчатых руд галенит-халькопирит-сфалерит-пиритового состава (Тишинское месторождение); З – тесные сращения пирротина, халькопирита и сфалерита (Новоберезовское месторождение); И – халькопирит развивается по трещинам в пирите, пирротин развивается в интерстициях крупных выделений пирита, на контакте корродирует и замещает пирит (Новоберезовское месторождение); К – выделения халькопирита, галенита, сфалерита и пирита в интерстициях кварца (Риддер-Сокольное месторождение); Л – пирит гранобластовой структуры (Малеевское месторождение); М – идиоморфный метакристалл пирита, образованный за счёт перераспределения вещества в слоистых рудах (Малеевское месторождение); Н – каёмки галенита по краям выделений сфалерита, на контакте с галенитом также наблюдается укрупнение и перекристаллизация зёрен пирита (Зыряновское месторождение); О – в агрегате катаклазированных сульфидов выделения блёклой руды замещают пирит (Березовское месторождение); П – реликты катаклазированного пирита в халькопирит-пирротин-сфалеритовом агрегате (Новоберезовское месторождение); Р – перераспределение галенита и сфалерита с образованием полосчатой микротекстуры по сланцеватости в результате динамометаморфизма первичных руд (Артемьевское месторождение); С – реликты слоистой текстуры в метаморфизованных рудах (Малеевское месторождение); Т – игольчатые кристаллы актинолита корродируют сфалерит-халькопирит-пиритовый агрегат сульфидов (Малеевское месторождение); У – аллотриоморфные выделения магнетита в медно-цинковых рудах (Малеевское месторождение); Ф – электрум в тесном сращении с галенитом и сфалеритом, развивающихся в интерстициях пирита (Риддер-Сокольное месторождение); сокращения: Py – пирит, Gn – галенит, Spl – сфалерит, Chr – халькопирит, Fh – блёклая руда, Pyr – пирротин, Ac – актинолит, Mt – магнетит, El – электрум



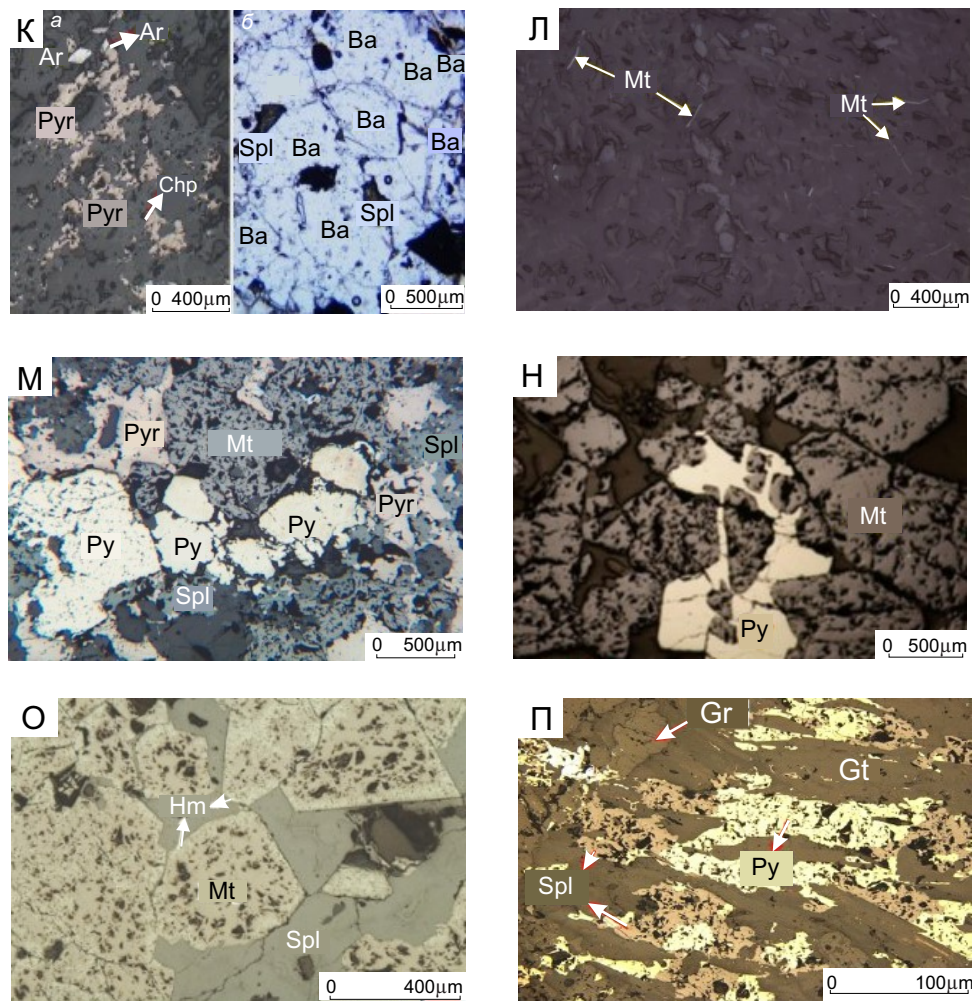


Рис. 7. Минеральный состав руд рудных районов Ашеле, Келан и Майзи. С использованием материалов [70, 72, 76, 77, 84, 85, 90, 92, 95, 96]:

А – сфалерит и галенит цементируют выделения аллотриоморфного пирита (по краям скоплений за счёт пирита развивается пирротин) (месторождение Кекетале); Б – округлые зёрна пирита в матрице из халькопирита и сфалерита (месторождение Ашеле); В – коллоидный пирит (месторождение Вуласигу); Г – крупнозернистый пирит и сфалерит с халькопиритовой сыпью, а также пирротин-халькопиритовые сростки (месторождение Кейнбулейк); Д – массивная руда, состоящая из пирита, пирротина, галенита и сфалерита (месторождение Талате); Е – пирит с катакlastической текстурой, замещённый халькопиритом (месторождение Ашеле); Ж – катакlastическая текстура пирита (месторождение Сарсук); З – сфалерит и тетраэдрит, замещающие пирит (месторождение Ашеле); И – идиоморфный пирит и галенит, замещающие сфалерит (месторождение Кейнбулейк); К – идиоморфный арсенопирит (месторождение Кекетале) (а) и барит со сфалеритом (месторождение Кекетале) (б); Л – игольчатый магнетит в полосчатых рудах (месторождение Кейнбулейк); М – магнетит в ассоциации с пиритом и пирротинном (месторождение Кекетале); Н – сростание пирита и магнетита (месторождение Темирт); О – гематит, заменяющий магнетит по краям кристаллов (месторождение Вуласигу); П – мелкозернистый сфалерит и пирит образуют микрополосчатость, параллельную грюнериту (месторождение Савуси); сокращения: Py – пирит, Gn – галенит, Spl – сфалерит, Pyr – пирротин, Chp – халькопирит, Mt – магнетит, Td – тетраэдрит, Ar – арсенопирит, Ba – барит, Hm – гематит, Gr – гранат, Gt – грюнерит

ность формирования и сильное влияние тектоно-метаморфических процессов [72, 76, 77] (см. рис. 7).

На месторождении Кекетале рудные залежи согласно залегают с вмещающими породами, имеют пластовую форму с раздувами и пережимами

мощности. Основные типы руд – свинцово-цинковый и полиметаллический. Соотношение Pb/Zn увеличивается с глубиной. Главные рудные минералы – пирит, сфалерит, галенит, с небольшим количеством пирротина, редкими халькопиритом, арсенопиритом и марказитом. Кроме того, в рудах отмечаются следы тетраэдрита и борнита. Среди типов руд преобладают массивные, плотновкрапленные, а ещё вкрапленные с тонкими прожилками. Для месторождения Савуси характерно наличие большого количества сфалерита и пирита, а также незначительное количество галенита, магнетита и других сульфидных минералов. Эти минералы крупнозернистые, имеют вкрапленную, полосчатую структуру или образуют прожилки и микрожилы в полосчатых скарпах. Скарны на месторождении содержат богатый марганцем грюнерит, гранат (в основном альмандин и спессартин) и биотит.

Изотопный состав серы. Изучение изотопного состава серы ($\delta^{34}\text{S}$) сульфидных и сульфатных минералов является одним из наиболее информативных методов в геохимии и генетической минералогии, позволяющим реконструировать источники рудного вещества, а также условия и многостадийность процессов рудообразования. В настоящем исследовании обобщены и проанализированы обширные литературные данные, а также результаты собственных исследований. На основе систематизации этих материалов создана комплексная база данных, включающая 1687 определений $\delta^{34}\text{S}$ по широкому спектру месторождений и рудопроявлений колчеданно-полиметаллического типа Большого Алтая. В ходе исследований выявлены общие закономерности и региональные особенности изотопии серы, а также проведена интеграция разноплановой информации с целью оценки роли различных источников серы (магматогенного, метаморфогенного, осадочного, биогенного) и реконструкции эволюции палеогидротермальных систем. Установлено, что большинство крупных и уникальных месторождений характеризуются широким диапазоном значений $\delta^{34}\text{S}$ – от -15 до +9,8 ‰ (Риддер-Сокольное, Корбалихинское, Новоленинское, Кекетале, Ашеле), что указывает на гетерогенный источник серы.

Российский Алтай. Змеиногорский рудный район. На основании анализа изотопного состава серы ($\delta^{34}\text{S}$) рудных образцов месторождений Корбалихинское, Семеновское, Лазурское, Зареченское, Змеиногорское, Стрижковское, а также

рудопроявлений Холодное, Вересухинское и Давыдовское выявлены значительные вариации значений $\delta^{34}\text{S}$, свидетельствующие о сложных и разнообразных условиях рудообразования [9, 17, 25, 30, 31, 39, 45] (рис. 8, А). Диапазон значений $\delta^{34}\text{S}$ варьируется от -12,25 до +19,5 ‰, охватывая как отрицательные, так и положительные величины, что указывает на участие различных источников серы и многостадийность процессов минералообразования.

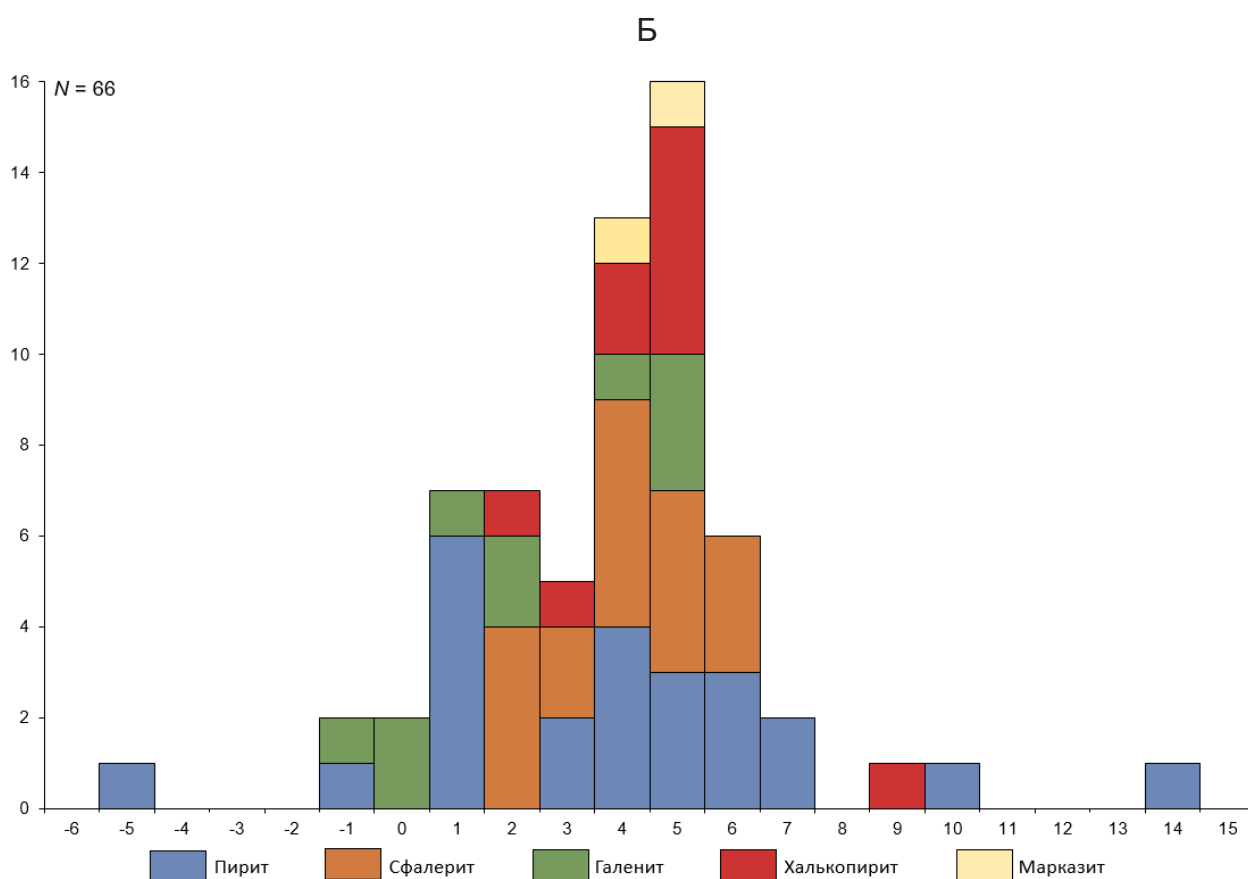
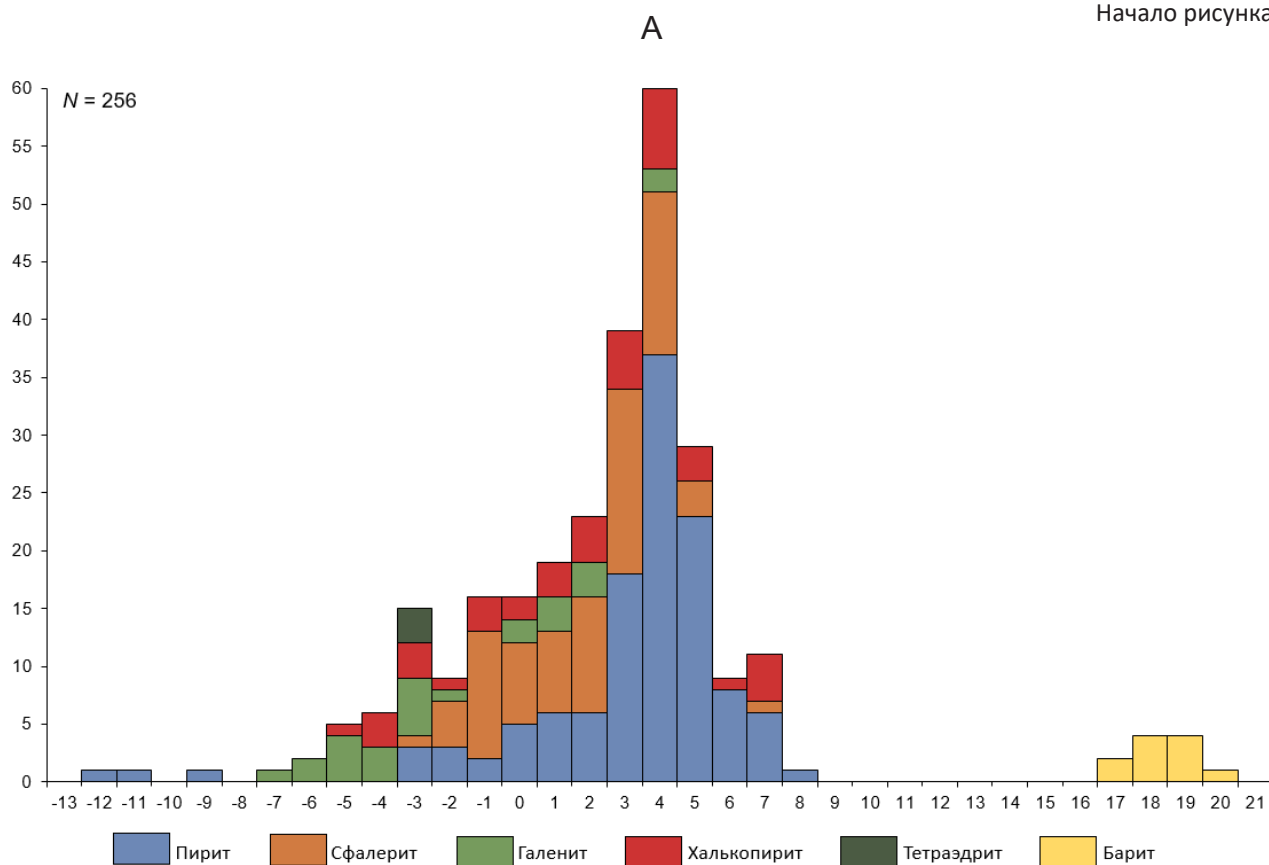
Для Корбалихинского месторождения, наиболее полно охарактеризованного данными [17, 25, 30], значения $\delta^{34}\text{S}$ в сульфидах (пирит, халькопирит, сфалерит, галенит) демонстрируют широкий разброс: от -12,25 до +7 ‰. Наблюдается тенденция к более тяжёлому изотопному составу серы в пирите по сравнению с сопутствующими сульфидами (сфалерит, халькопирит) в пределах одних и тех же проб, что может быть следствием изотопного фракционирования в ходе последовательной кристаллизации минералов или различий в условиях их осаждения.

Значительный разброс данных, включая отрицательные значения, позволяет предполагать вклад бактериального восстановления сульфатов (BSR) в формирование части руд, тогда как положительные значения приближены к магматическому или метаморфогенному источнику серы [19].

На месторождениях Семеновское и Лазурское зафиксированы преимущественно положительные значения $\delta^{34}\text{S}$ [30]. Для Семеновского месторождения значения сфалерита колеблются в узком диапазоне от -0,5 до +0,4 ‰. На Лазурском месторождении значения варьируются от +4,1 до +7 ‰, при этом наиболее высокие (до +7 ‰) ассоциируют с сульфидно-кварцевыми жилами, что может указывать на гидротермальный источник серы с признаками изотопного утяжеления, возможно, связанного с фракционированием в высокотемпературных условиях или взаимодействием с вмещающими толщами.

Данные по рудопроявлениям (Холодное, Вересухинское, Давыдовское) также демонстрируют вариабельность [31]. В рудопроявлении Холодное значения $\delta^{34}\text{S}$ пирита и халькопирита находятся в диапазоне от +2,1 до +4,4 ‰. Для Вересухинского рудопроявления значения халькопирита возрастают от +1,6 до +4,3 ‰. На Давыдовском рудопроявлении зафиксирован крайне широкий разброс значений пирита – от -2 до +7,2 ‰, что может отражать наличие нескольких генераций минерало-

Начало рисунка 8



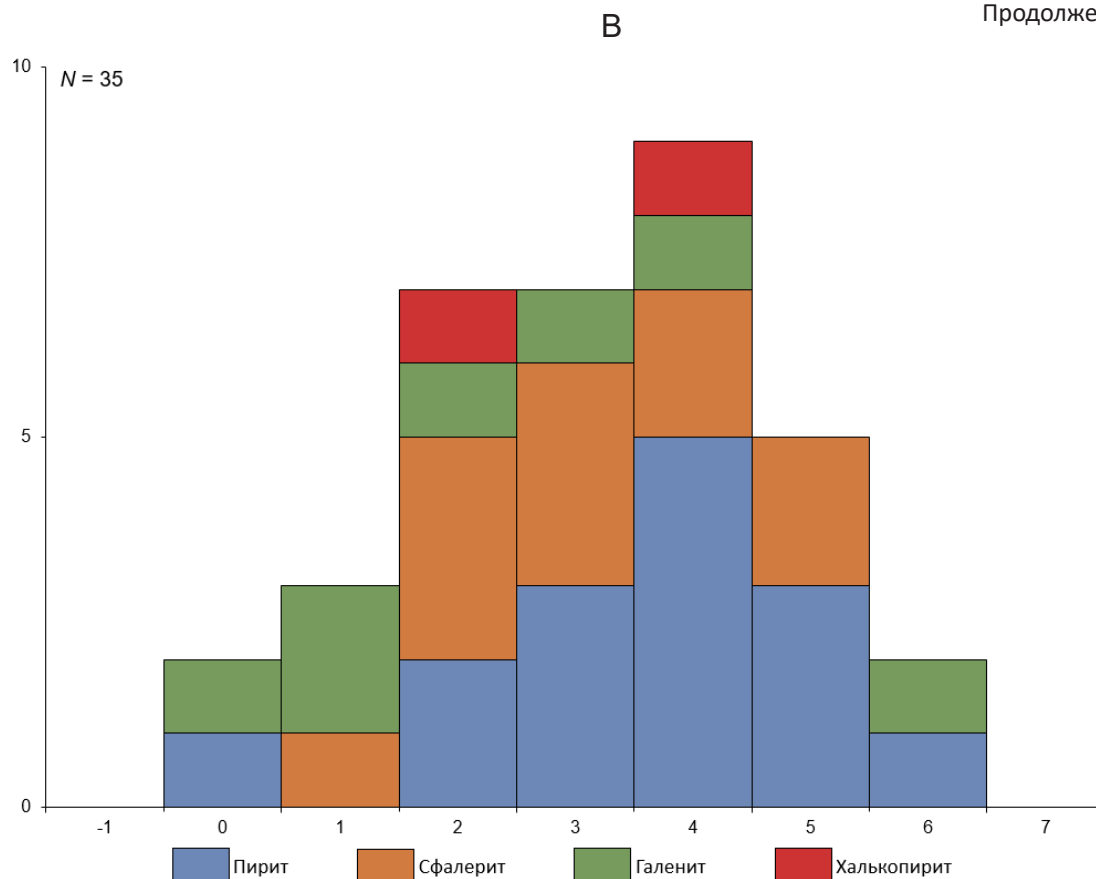


Рис. 8. Гистограмма распределения $\delta^{34}\text{S}$ в сульфидах месторождений типа VMS Российской части Большого Алтая. С использованием материалов [9, 17, 25, 30, 31, 39, 45]:

А – Змеиногорский рудный район (месторождения Корбалихинское, Зареченское, Лазурское, Семеновское, Змеиновское, Стрижковское; рудопроявления Холодное, Вересухинское, Давыдовское); Б – Рубцовский рудный район (месторождения Захаровское, Западно-Захаровское); В – Золотушинский рудный район (месторождение Юбилейное)

образования или смешение серы из разных источников.

Особый интерес представляют данные по Зареченскому месторождению, где наряду с сульфидами проанализирован барит [9, 17]. Значения $\delta^{34}\text{S}$ в сульфидах здесь в основном отрицательные (пирит до -3,8 ‰, сфалерит до -2,9 ‰, галенит до -7,5 ‰, халькопирит до -5 ‰), в то время как для барита характерны исключительно высокие положительные значения (от +16,25 до +19,5 ‰). Такой контраст типичен для систем, где сера сульфидов имеет биогенное происхождение (лёгкая сера), а сера сульфатов (барит) унаследована из морских сульфатов (тяжёлая сера), что подтверждает гидротермально-осадочный генезис с участием

бактериальных процессов. Современные исследования Зареченского месторождения указывают на сложную многостадийность процесса [9]: выделяются несколько генераций пирита – ранний пирит I с варьирующими значениями (от -0,9 до +2,7 ‰) и более поздний пирит II, демонстрирующий сдвиг в сторону отрицательных значений (до -1,5 ‰). Сфалерит Ib показывает положительные значения (+3,9...+6,4 ‰), что может соответствовать иному этапу минерализации или изменению физико-химических условий. Галенит I характеризуется небольшими положительными значениями (до +1,3 ‰), а халькопирит I – устойчиво отрицательными (до -4,6 ‰). Присутствие тетраэдрита с отрицательными значениями $\delta^{34}\text{S}$

(до -3,7 ‰) также указывает на восстановленные условия на определённых стадиях. Это подчёркивает сосуществование в пределах одного месторождения изотопно-лёгкой серы, вероятно, биогенной, и более тяжёлой, связанной с глубинными гидротермальными источниками.

Змеиногорское месторождение отличается преобладанием отрицательных и околонулевых значений $\delta^{34}\text{S}$ [9]. Пирит здесь имеет значение -1,8 ‰, сфалерит варьирует от -1,5 до -1,2 ‰, а халькопирит демонстрирует нулевое значение, что указывает на доминирование единого восстановленного источника серы с возможным незначительным фракционированием при кристаллизации.

На Стрижковском месторождении также фиксируется значительный разброс значений, связанный с полистадийностью [9]. Ранние ассоциации (пирит I, сфалерит Ia, халькопирит I) характеризуются отрицательными значениями $\delta^{34}\text{S}$ (от -3,3 до -1,2 ‰). Поздние генерации (пирит II) показывают как отрицательные, так и слабоотрицательные значения (до -0,2 ‰). Однако особенно выделяются аномально высокие для сульфидов положительные значения в сфалерите Ib (+4,6 ‰), что, как и на Зареченском, маркирует отдельную, вероятно, более высокотемпературную стадию с иным изотопным составом серы. Тетраздрит и галенит I на месторождении стабильно обогащены лёгким изотопом ($\delta^{34}\text{S}$ до -4,4 ‰).

Рубцовский рудный район. Изотопный состав серы сульфидных минералов месторождений Захаровское и Западно-Захаровское характеризуется значительным диапазоном значений $\delta^{34}\text{S}$ – от -5,8 до +13,4 ‰ [17, 31, 45]. Этот широкий разброс является ключевым индикатором гетерогенности источников серы и сложной, многостадийной истории формирования колчеданно-полиметаллического оруденения в рудном районе. Общая тенденция к преобладанию положительных значений согласуется с моделью гидротермальных систем, ассоциированных с вулканической деятельностью в морских условиях, где могло происходить взаимодействие рудообразующих флюидов с резервуарами морских сульфатов. При этом локальные экстремальные отклонения в обе стороны от фона свидетельствуют о наложении разнонаправленных процессов изотопного фракционирования (см. рис. 8, Б).

Сопоставление данных по отдельным месторождениям выявляет важные генетические особенности. Для Захаровского месторождения ха-

рактерен относительно узкий спектр значений, тяготеющий к околонулевым величинам, особенно для пирита (от -1,3 до +2,1 ‰). Это может указывать на доминирующую роль глубинного, близкого к мантийному, источника серы в рамках консолидированной гидротермальной системы. Напротив, изотопные данные по Западно-Захаровскому месторождению отличаются выраженной вариабельностью. Наличие резко отрицательных значений (до -5,8 ‰) интерпретируется как следствие вовлечения в рудообразующий процесс серы, подвергшейся бактериальному восстановлению в приповерхностных седиментационных или раннедиагенетических условиях. Одновременно крайне тяжёлые изотопные составы (до +13,4 ‰) фиксируют или высокотемпературное фракционирование в закрытой системе, или ассимиляцию тяжёлого изотопного пула морских сульфатов.

Пространственное распределение данных в пределах Западно-Захаровского месторождения, в частности вариации $\delta^{34}\text{S}$ в различных зонах «трубок палеокурильщика» (осевой, промежуточной, внешней), позволяет реконструировать динамику палеогидротермальной системы [31]. Данные отражают градиенты физико-химических параметров, таких как температура, окислительно-восстановительный потенциал и кислотность, которые контролировали последовательность осаждения сульфидов. Важным аргументом в пользу осаждения из единого флюида является наличие идентичных значений $\delta^{34}\text{S}$ для парагенетических ассоциаций сфалерита, халькопирита и галенита в массивных рудах.

Золотушинский рудный район. На основании анализа изотопного состава серы ($\delta^{34}\text{S}$) сульфидных минералов месторождения Юбилейное выявлен характерный диапазон значений от -0,6 до 5,6 ‰, что свидетельствует об относительной однородности изотопного состава серы в исследованных образцах [17] (см. рис. 8, В). Преобладают положительные значения $\delta^{34}\text{S}$, изменяющиеся в узких пределах для каждого минерала: для пирита – от 0 до 5,1 ‰ (среднее значение около 3,2 ‰), для сфалерита – от 0,6 до 4,8 ‰ (среднее около 2,7 ‰), для галенита – от -0,6 до 5,6 ‰ (среднее около 1,9 ‰) и для халькопирита – от 1,5 до 3,3 ‰. Полученные данные, демонстрирующие небольшой разброс изотопных отношений и положительный сдвиг относительно метеоритного стандарта, согласуются с моделью формирования колчеданно-полиметаллического оруденения

в условиях гидротермально-осадочного процесса с участием серы, источник которой мог быть связан с глубинными магматическими резервуарами или восстановлением сульфатов морской воды в ходе термохимического восстановления. Отсутствие резко отрицательных значений $\delta^{34}\text{S}$ позволяет исключить существенную роль биогенных процессов сульфатредукции, что указывает на преобладание магматогенного или метаморфогенного источника серы в рудообразующей системе.

Казахстанский Алтай. Прииртышский рудный район. Данные по изотопному составу серы сульфидов и сульфатов из массивных руд месторождений Белоусовского, Иртышского, Березовского и Новоберезовского демонстрируют значительный разброс значений, который варьирует от -5,5 до +24,5 ‰, что указывает на разнородные источники серы и сложные условия рудообразования [33] (рис. 9, А).

Для сульфидных минералов (пирит, халькопирит, сфалерит, галенит) значения $\delta^{34}\text{S}$ в основном находятся в положительном диапазоне от +0,5 до +6,5 ‰, за исключением галенита Белоусовского месторождения, где зафиксированы отрицательные значения (-2,5 и -5,5 ‰). Это может свидетельствовать о влиянии бактериального восстановления сульфатов или иных биогенных процессов на формирование части сульфидных руд. В отличие от сульфидов, барит характеризуется аномально высокими и узколокализованными значениями $\delta^{34}\text{S}$ – от +20,5 до +24,5 ‰, что типично для серы морских сульфатов и свидетельствует о его образовании из другого, более окисленного резервуара серы, возможно, связанного с сульфатами морской воды.

Лениногорский рудный район. На основе анализа данных по изотопному составу серы сульфидов и сульфатов из месторождений Риддер-Сокольское, Новолениногорское, Тишинское, Старковское, Габриэлевское выявлены значительные вариации значений, указывающие на полигенность и многостадийность процессов рудообразования [4, 12, 19, 33]. Значения $\delta^{34}\text{S}$ для сульфидных минералов (пирит, сфалерит, халькопирит, галенит, блёклые руды) варьируются в широком диапазоне от -12,5 до +8,5 ‰, демонстрируя как положительные, так и отрицательные величины. При этом барит характеризуется резко обогащённым тяжёлым изотопом серы со значениями состава от +14,75 до +22,25 ‰ (см. рис. 9, Б).

Пирит из вмещающих толщ месторождения Риддер-Сокольское имеет значения $\delta^{34}\text{S}$ от -4,5 до +4,5 ‰ [5, 19, 33]. Сульфиды массивных полиметаллических руд того же месторождения показывают разброс от -12,5 (галенит) до +3,5 ‰ (пирит). Сульфидная минерализация кварцевых жил демонстрирует значения от -3,5 (галенит) до +8,5 ‰ (пирит).

Для Новолениногорского месторождения диапазон $\delta^{34}\text{S}$ в сульфидах полиметаллических, колчеданно-полиметаллических и барит-полиметаллических руд также весьма широк: от -10,25 (галенит) до +4,75 ‰ (пирит), а в барите – до +22,25 ‰ [33].

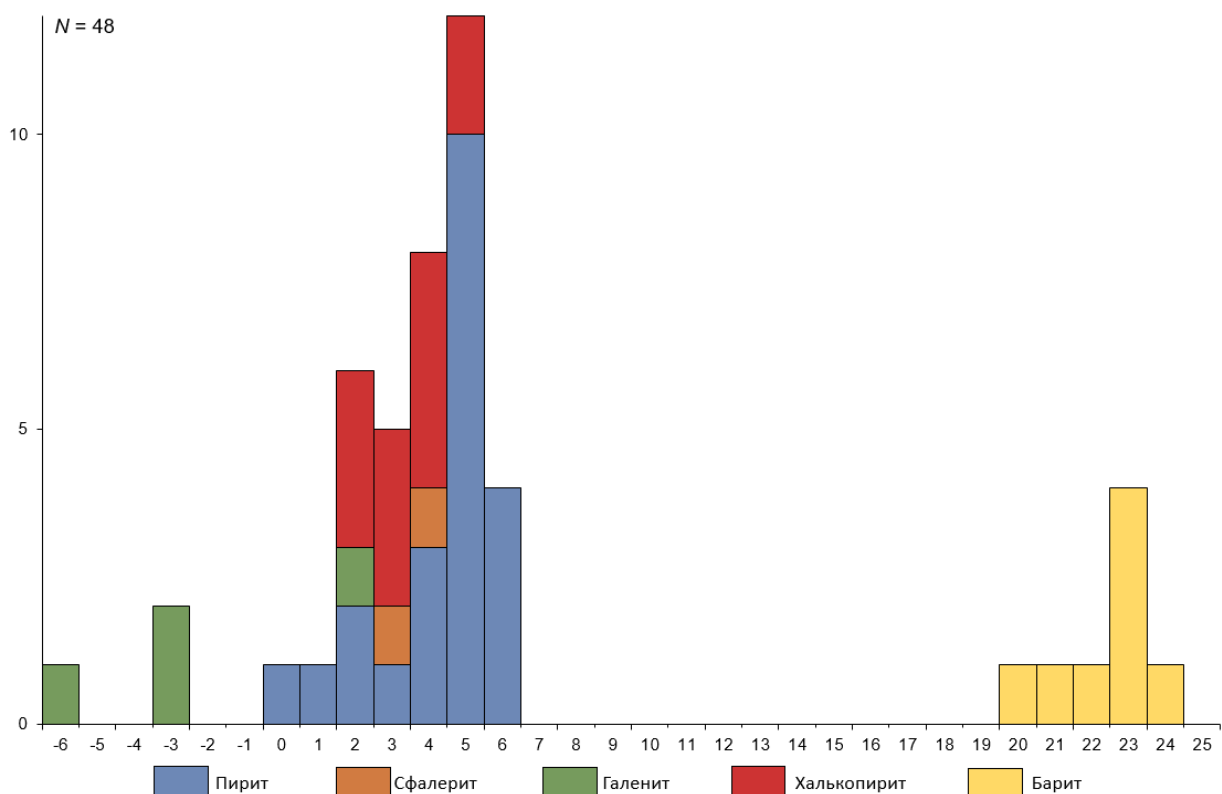
Данные по месторождениям Тишинское и Старковское, приведённые в работах [12, 19], подтверждают общую тенденцию к вариациям $\delta^{34}\text{S}$ в сульфидах в основном в промежуточном диапазоне с преобладанием положительных значений.

Зыряновский рудный район. Значения $\delta^{34}\text{S}$ рудных образцов месторождений Зыряновское, Греховское-II, Снегиревское, Александровское, Богатыревское и Малеевское демонстрируют значительный разброс – от отрицательных величин (-1,75 ‰ для пирита Малеевского месторождения) до положительных (до 8,75 ‰ для сфалерита из рудоносных брекчий того же месторождения) [6, 12, 19, 60]. Однако преобладающий диапазон для большинства сульфидных минералов (пирита, сфалерита, халькопирита, галенита) сосредоточен вблизи метеоритного стандарта (0 ‰), преимущественно в интервале от 0 до +6 ‰ (рис. 9, В). Это указывает на глубинный, вероятно, магматический источник серы с возможным влиянием процессов восстановления сульфатов морской воды или биогенных процессов.

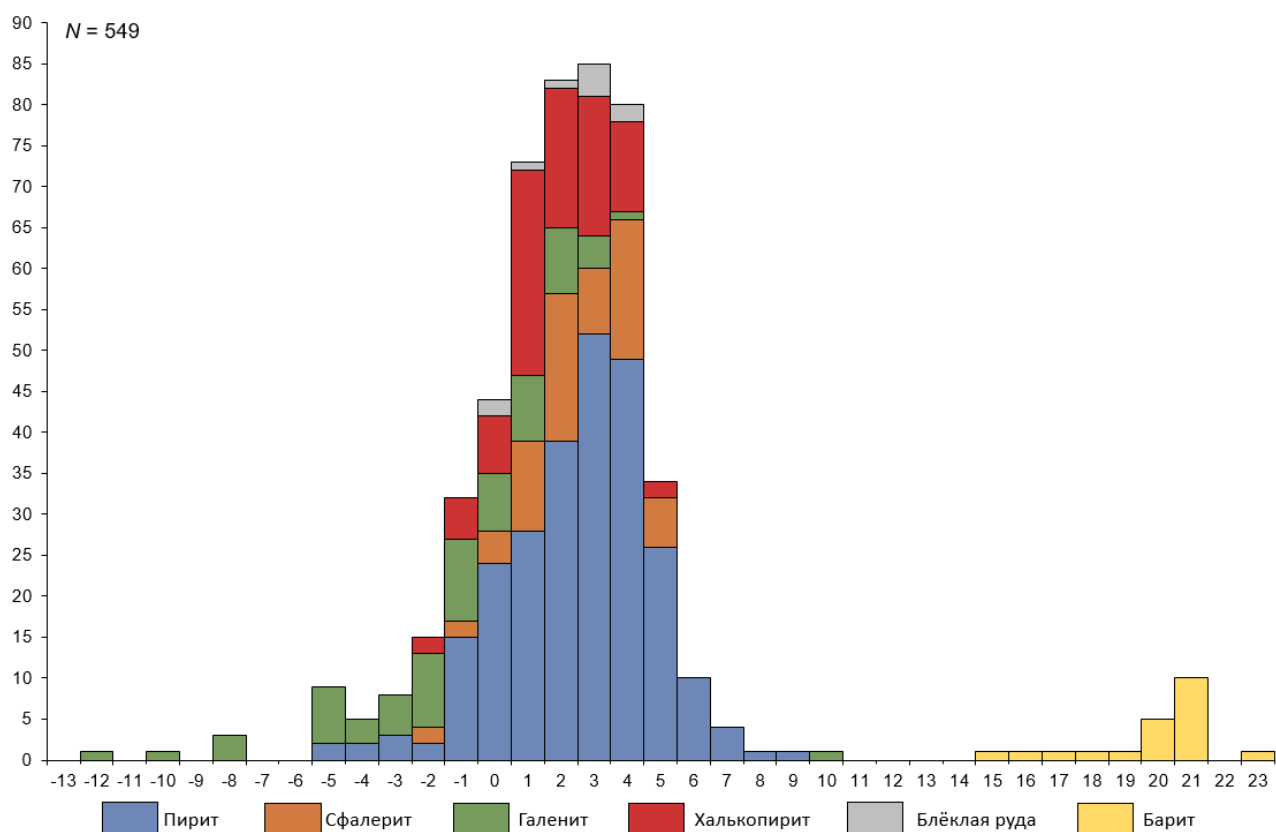
Наблюдается определённая минералогическая специализация в изотопном составе. Пирит, как наиболее распространённый сульфид, часто показывает более тяжёлый изотопный состав по сравнению с сопутствующими минералами. Например, на Зыряновском месторождении значения $\delta^{34}\text{S}$ в пирите из серноколчеданных руд варьируются от 4,1 до 5,5 ‰, в то время как в полиметаллических рудах того же минерала они снижаются (1,3–4 ‰) [6]. Ещё более лёгкой серой характеризуются галенит (0,1–2,3 ‰) и сфалерит (0,8–4,3 ‰). Вариации изотопного состава связаны с типом руд. Серноколчеданные и массивные руды, как правило, обогащены тяжёлым изотопом ^{34}S ($\delta^{34}\text{S}$ часто > +4 ‰), что может быть следствием

Начало рисунка 9

А



Б



В

Продолжение рисунка 9

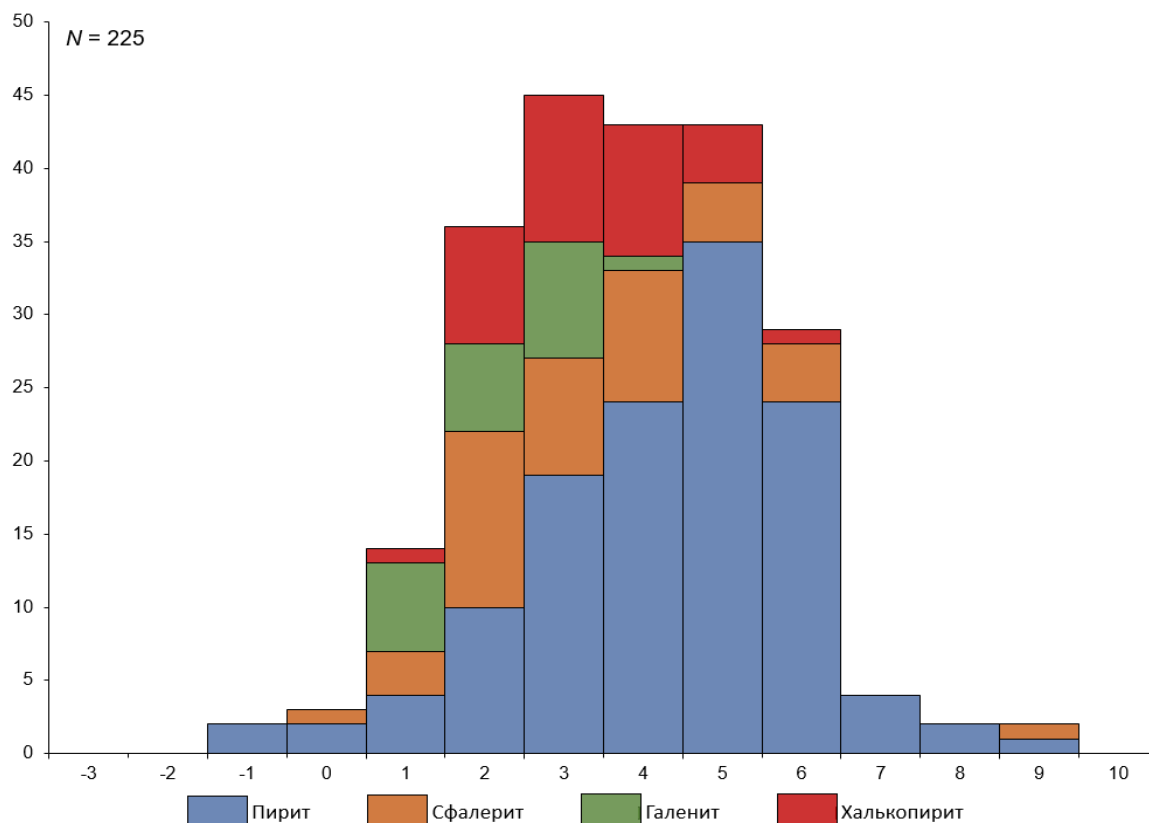


Рис. 9. Гистограмма распределения $\delta^{34}\text{S}$ в сульфидах месторождений типа VMS Казахской части Большого Алтая. С использованием материалов [3, 6, 12, 19, 33, 60]:

А – Прииртышский рудный район (месторождения Белоусовское, Иртышское, Березовское, Новоберезовское);
 Б – Лениногорский рудный район (месторождения Риддер-Сокольное, Тишинское, Новолениногорское, Старковское, Габриэлевское);
 В – Зыряновский рудный район (месторождения Зыряновское, Малеевское, Греховское-2, Снегиревское, Александровское, Богатыревское)

участия сульфатов морской воды в рудообразующих системах. Напротив, полиметаллические руды и руды альпийских жил демонстрируют более лёгкий изотопный состав, что свидетельствует о большей роли восстановленных серосодержащих соединений или биогенных процессов.

Особый интерес представляют данные по Малеевскому месторождению, детально изученному в работе [60]. Широкий разброс $\delta^{34}\text{S}$ в пирите (от -1,75 до +8,25 ‰) из различных геологических обстановок – рудоносных брекчий, колчеданно-полиметаллических и серноколчеданных руд, а также вмещающих пород (риолитов, базальтов, алевролитов) – указывает на сложный многостадийный процесс рудообразования. Наличие отри-

цательных значений в риолитах и алевролитах может свидетельствовать о вовлечении лёгкой биогенной серы. В целом изотопные данные подтверждают модель формирования месторождения, связанную с гидротермальной деятельностью и метаморфогенными процессами, наложенными на вулканогенно-осадочный субстрат.

Китайский Алтай. Рудный район Ашеле. Комплексный анализ изотопного состава серы сульфидных и сульфатных минералов проведён для месторождений Ашеле и Кейнбулейк [79, 81, 88, 91, 95] (рис. 10, А).

Для месторождения Ашеле характерен значительный разброс значений $\delta^{34}\text{S}$ сульфидов: от -3,7 у галенита до +8,5 ‰ у пирита [79, 81, 88, 91]. Это

свидетельствует о гетерогенности источников серы и изменении физико-химических условий в процессе минералообразования. Наличие лёгких изотопных составов у галенита может указывать на вовлечение биогенной серы или интенсивную бактериальную сульфатредукцию. Резкий контраст создаёт барит с аномально тяжёлым и узким изотопным составом (+20,4...+21,4 ‰), типичным для морских сульфатов. Такие данные позволяют реконструировать сложную гетерогенную систему с участием магматогенно-гидротермальных флюидов, серы осадочных толщ и, возможно, биогенного резервуара, что согласуется с моделью формирования в вулканогенно-осадочной среде с последующим наложением жильной минерализации.

Месторождение Кейнбулейк демонстрирует иную изотопно-геохимическую картину. Исследованные сульфиды (пирит, халькопирит, сфалерит) показывают относительно узкий и стабильно положительный диапазон $\delta^{34}\text{S}$ от +0,84 до +3,61 ‰ [94]. Такая однородность, отсутствие резких отрицательных аномалий и близость значений к метеоритному стандарту с небольшим положительным смещением указывают на преобладающий магматогенный или мантийный источник серы. Минералообразование протекало в условиях высокотемпературного гидротермального процесса с относительной изотопной равновесностью и минимальным влиянием биогенных процессов или существенного фракционирования.

Рудный район Келан. Изучение изотопного состава серы сульфидных минералов месторождений Талате, Тимурт, Кьяксия и Вуласигу позволяет выявить особенности генезиса рудообразующих систем и источников серы [63, 67, 71, 82, 85, 90, 92, 93] (см. рис. 10, Б).

На месторождении Кьяксия анализ пиритов первой стадии минерализации показывает вариации $\delta^{34}\text{S}$ от -1,1 до -14,2 ‰, что свидетельствует о существенном фракционировании изотопов серы, возможно, связанном с биогенными процессами или низкотемпературным гидротермальным рудообразованием [71]. Для второй стадии характерны значения, близкие к нулевым (от -3,4 до +0,7 ‰), что может указывать на магматогенный или мантийный источник серы с минимальным фракционированием.

На месторождении Талате зафиксирован широкий диапазон $\delta^{34}\text{S}$ – от +2,4 до -11,7 ‰, охватывающий как положительные, так и отрицатель-

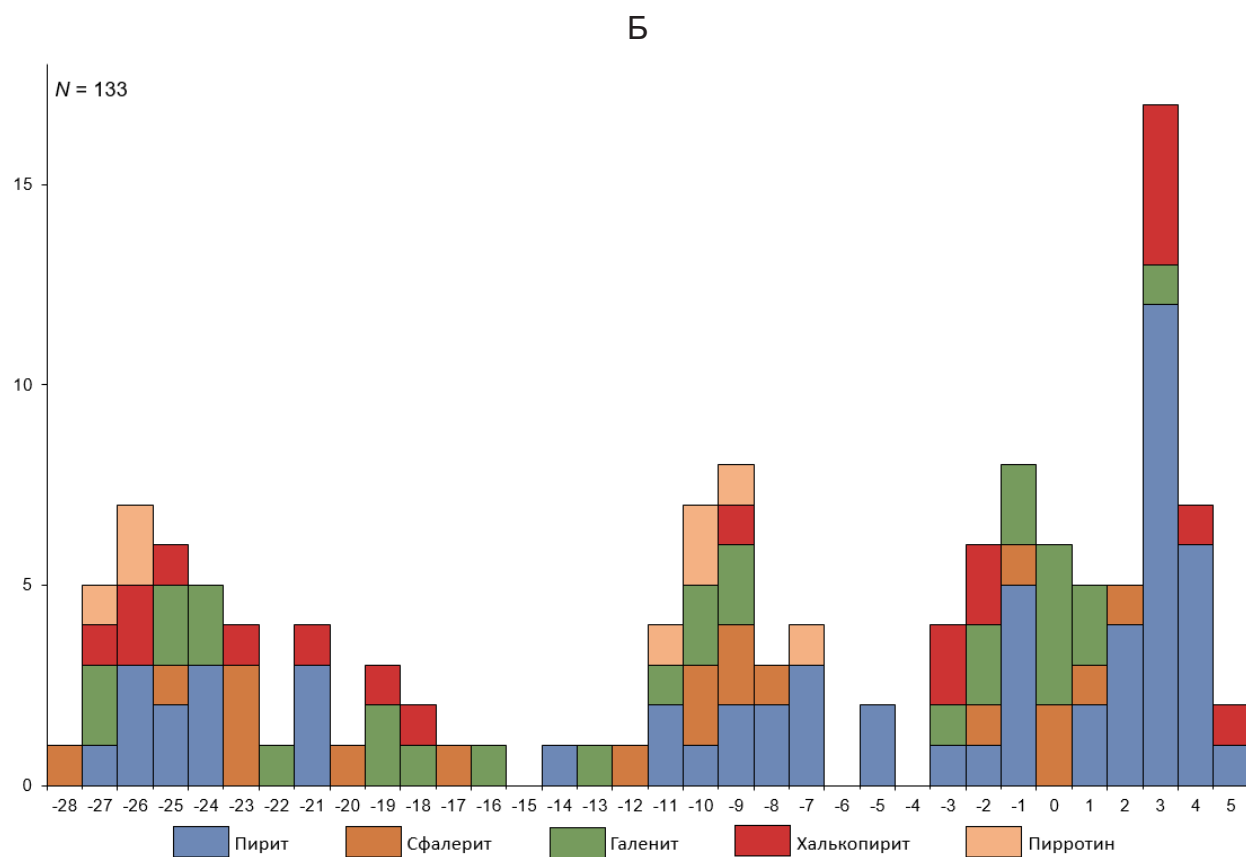
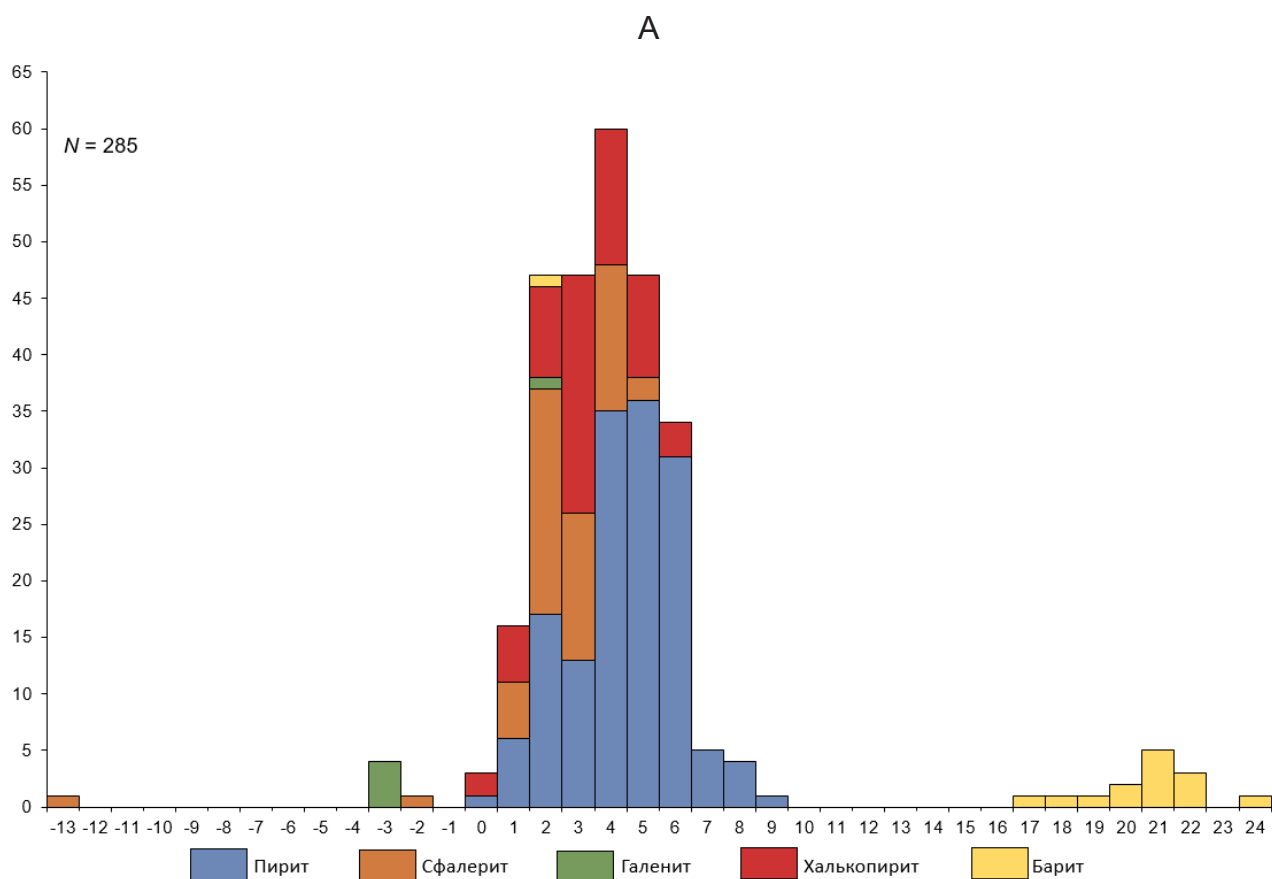
ные значения [90, 93]. Положительные значения (до +2,4 ‰) соответствуют изотопному составу, близкому к мантийному или магматогенному резервуару, тогда как отрицательные (до -11,7 ‰) предполагают вовлечение лёгкой серы, возможно, осадочного или биогенного происхождения. Присутствие различных сульфидов – пирита, халькопирита, сфалерита, галенита и пирротина – с сопоставимыми изотопными характеристиками указывает на гомогенизацию серы в ходе рудообразующего процесса.

Наиболее выразительные изотопные аномалии наблюдаются на месторождении Тимурт, где значения $\delta^{34}\text{S}$ варьируют в интервале от +2,23 до -28,17 ‰ [67, 82, 92]. Преобладание сильно отрицательных величин (ниже -20 ‰) свидетельствует о значительном влиянии бактериальной сульфатредукции. При этом наличие как отрицательных, так и близких к нулю значений в пределах одного месторождения отражает многостадийность минералообразования и возможное смешение серы из разных источников.

На месторождении Вуласигу изотопный состав серы характеризуется преимущественно положительными значениями $\delta^{34}\text{S}$, варьирующими от -1,9 до +4,2 ‰ [63, 85]. Пириты ранних стадий минерализации демонстрируют устойчивые положительные значения (в основном от +2,3 до +3,8 ‰), что указывает на доминирование магматогенного источника серы. Халькопириты и галениты также показывают сходные изотопные характеристики (от +0,7 до +4,1 ‰), подтверждая гомогенизацию изотопного состава в гидротермальной системе. Небольшая вариабельность значений и отсутствие резко отрицательных аномалий позволяют предположить, что процесс рудообразования протекал в восстановительных условиях с ограниченным влиянием биогенной сульфатредукции и преобладанием глубинного источника серы.

Рудный район Майзи. Значения $\delta^{34}\text{S}$ сульфидных и сульфатных минералов месторождения Кекетале демонстрируют значительный разброс, варьируясь от -15,45 ‰ для сфалерита до +9,54 ‰ для барита [78, 80] (см. рис. 10, В).

Преобладают отрицательные значения, характерные для сульфидов. Для массивного пирита (первой генерации) диапазон значений составляет от -13,78 до -4,29 ‰, в то время как колломорфный пирит (второй генерации) показывает величины от -11,89 до -1,52 ‰. Пирит третьей генерации характеризуется значениями в интервале от -15,24



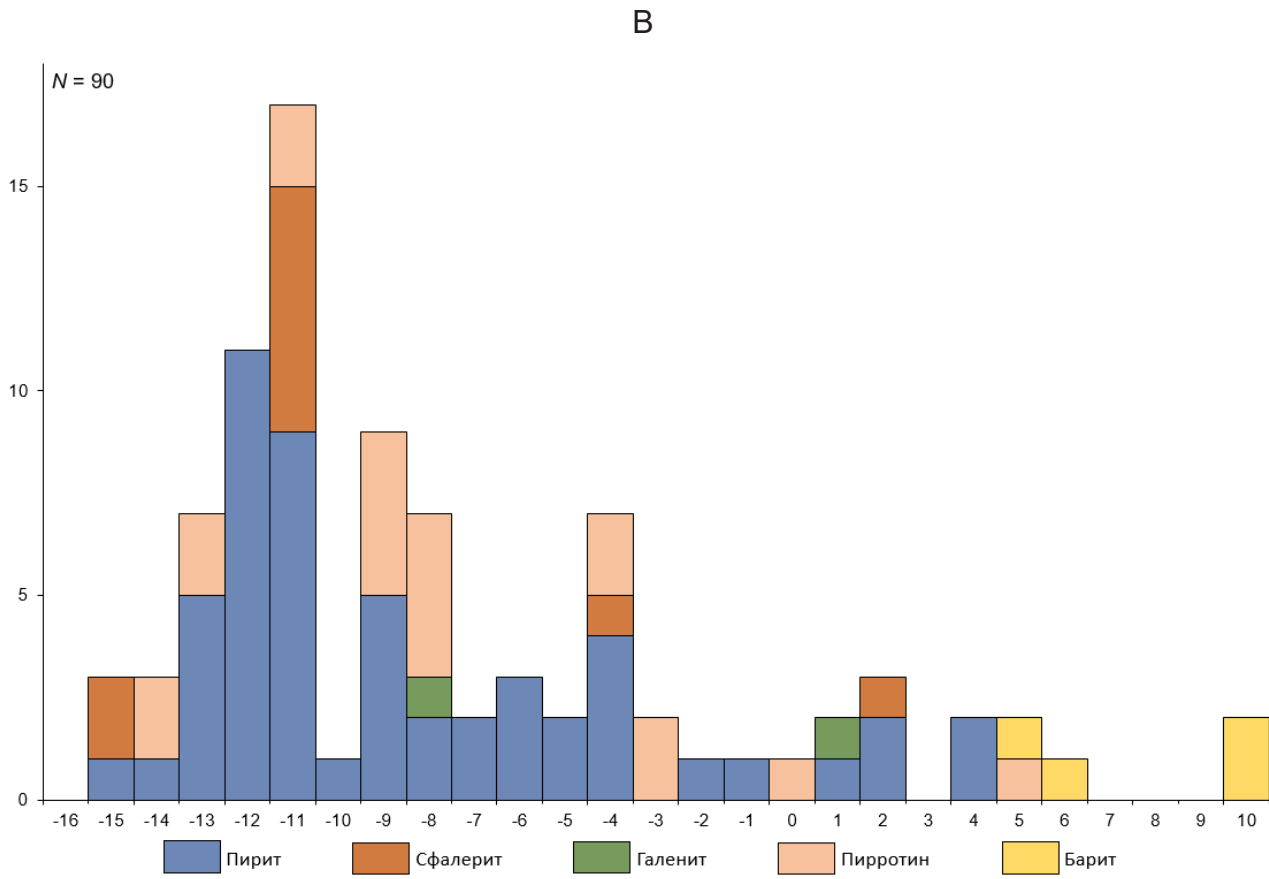


Рис. 10. Гистограмма распределения $\delta^{34}\text{S}$ в сульфидах месторождений типа VMS Китайской части Большого Алтая. С использованием материалов [63, 67, 71, 77, 79–82, 85, 88, 90, 91–93, 95]:

А – рудный район Ашеле (месторождения Ашеле, Кейнбулейк); Б – рудный район Келан (месторождения Талате, Тимурт, Вуласигу, Кьяксия); В – рудный район Майзи (месторождение Кекетале)

до -12,03 ‰, а пирит из эпигенетических прожилок – от -9,43 до -6,27 ‰. Массивный пирротин имеет значения от -14,44 до -3,34 ‰, а пирротин второй генерации – от -8,63 до -8,12 ‰. Сфалерит демонстрирует широкий разброс от -15,45 до -4,64 ‰, что может указывать на вариации физико-химических условий осаждения.

Положительные значения, характерные для барита (от +4,90 до +9,54 ‰), а также для части сульфидных минералов вкрапленных руд, свидетельствуют о возможном участии морских сульфатов или иного тяжёлого источника серы в рудогенезе.

Механизмы формирования месторождений типа VMS Большого Алтая. Представленный в предыдущих разделах фактический материал –

петрографическая характеристика вмещающих пород и околорудных метасоматитов, минеральный состав руд и изотопный состав серы – позволяет уточнить механизмы формирования месторождений типа VMS Большого Алтая, для которых эти данные выступают как взаимодополняющие индикаторы. На основе комплексного анализа современных исследований, посвящённых источникам рудного вещества колчеданно-полиметаллических месторождений Большого Алтая [23, 36, 55, 78], формируется многоаспектная, но внутренне согласованная картина. Все авторы рассмотренных работ сходятся в том, что формирование оруденения генетически и пространственно связано с девонским вулканизмом, протекав-

шим в условиях активной континентальной окраины, обусловленной субдукцией Палеоазиатского океана. Общими чертами всех работ являются признание глубинной (мантийно-коровой) природы источника металлов, его относительной химической и изотопной однородности в региональном масштабе, а также определяющая роль процессов, связанных с субдукцией.

Как показано в разделе «Вещественный состав вмещающих пород и околорудных метасоматитов», рудовмещающие толщи сложены вулканогенно-осадочными комплексами девонского возраста. Выделенные фации – (риолит)-известняково-терригенная, риолит-кремнисто-(карбонатно)-терригенная, базальт-риолит (карбонатно, углеродисто)-кремнистая и терригенно-базальт-риолитовая – отражают разные условия осаждения и степень влияния гидротермальной деятельности. Доля вулканитов в разрезе варьирует от 5–10 до 30–50 %, что определяет продуктивность потенциальных рудовмещающих горизонтов. В разделе «Изотопный состав серы» указаны три основных источника: магматогенный ($\delta^{34}\text{S}$ от 0 до +6 ‰), биогенный ($\delta^{34}\text{S}$ от -5 до -28 ‰) и морских сульфатов ($\delta^{34}\text{S}$ от +14,8 до +24,5 ‰). В то время как для российско-казахстанских месторождений доминирующим источником серы является магматогенный (значения $\delta^{34}\text{S}$ преимущественно сконцентрированы вблизи 0 ‰), для месторождений китайской части Большого Алтая (районы Келан и Майзи) характерен значительно более широкий диапазон значений $\delta^{34}\text{S}$. Наряду с положительными величинами здесь фиксируются и экстремально отрицательные значения (вплоть до -28,17 ‰).

Ключевым процессом, определившим рудообразование, стала деятельность палеогидротермальных систем на морском дне, функционировавших по механизмам, аналогичным современным «чёрным курильщикам» [1, 4, 5, 31, 32, 65, 68, 69, 75] (рис. 11, А). Эти системы формировались в зонах высокой геотермальной активности, где морская вода, проникая по разломам в кору, нагревалась до высоких температур за счёт субвулканических магматических очагов и интенсивно выщелачивала рудные элементы (Cu, Pb, Zn, Fe, Ag, Au, S) из вулканогенных пород. Образовавшиеся восстановленные высокотемпературные флюиды поднимались по концентрированным каналам разгрузки. При выходе на дно бассейна происходило их резкое охлаждение и смешение с хо-

лодной, богатой сульфатами морской водой, что вызывало осаждение сульфидов и формирование характерных конусообразных построек – гидротермальных холмов и активных «курильщиков» с сульфидными трубками. Динамика таких систем была нестабильной: периоды активного роста построек сменялись их обрушением вследствие землетрясений, внутренней полостизации или изменения гидростатического давления. Разрушение холмов и трубок приводило к накоплению у их подножия брекчий, состоящих из угловатых обломков сульфидных агрегатов, сцементированных более поздним гидротермальным материалом (см. рис. 11, Б). Таким образом формировались брекчиевые руды, часто переслаивающиеся с колломорфными и полосчатыми текстурами [31, 32, 46].

Сингенетичный гидротермально-осадочный механизм подтверждается текстурно-структурными особенностями руд (раздел «Минеральный состав руд»): брекчиевые, массивные, концентрически зональные и струйчатые текстуры, колломорфный пирит почковидного облика, присутствие рудокластов в вышележащих толщах, а также наличие барита с тяжёлой серой (морские сульфаты). Широкий диапазон $\delta^{34}\text{S}$ в сульфидах (например, от -12,25 до +7 ‰ на Корбалихинском, от -15,45 до +9,54 ‰ на Кекетале) отражает пульсационный приток флюидов с разным соотношением магматогенной и биогенной серы. Преобладание отрицательных значений в рудах месторождений китайской части металлогенической зоны (до -28 ‰) прямо указывает на активную бактериальную сульфатредукцию в осадочных отложениях.

Параллельно с донным осаждением действовал механизм «придонного замещения» (sub-seafloor replacement) [17, 74] (см. рис. 11, Б). Согласно этому механизму, часть высокотемпературных флюидов, не достигая поверхности дна, инфильтровалась в пористые и проницаемые горизонты под морским дном – вулканокластические отложения, туфы или рыхлые осадки. Внутри этих горизонтов происходило метасоматическое замещение первичных пород сульфидными минералами, что приводило к формированию стратиформных пластообразных и лентообразных рудных тел. Описанные в разделах «Минеральный состав руд» и «Вещественный состав вмещающих пород и околорудных метасоматитов» жильные, прожилковые, прожилково-вкрапленные текстуры руд, а также метасоматиты (кварц-серицитовые, хлори-

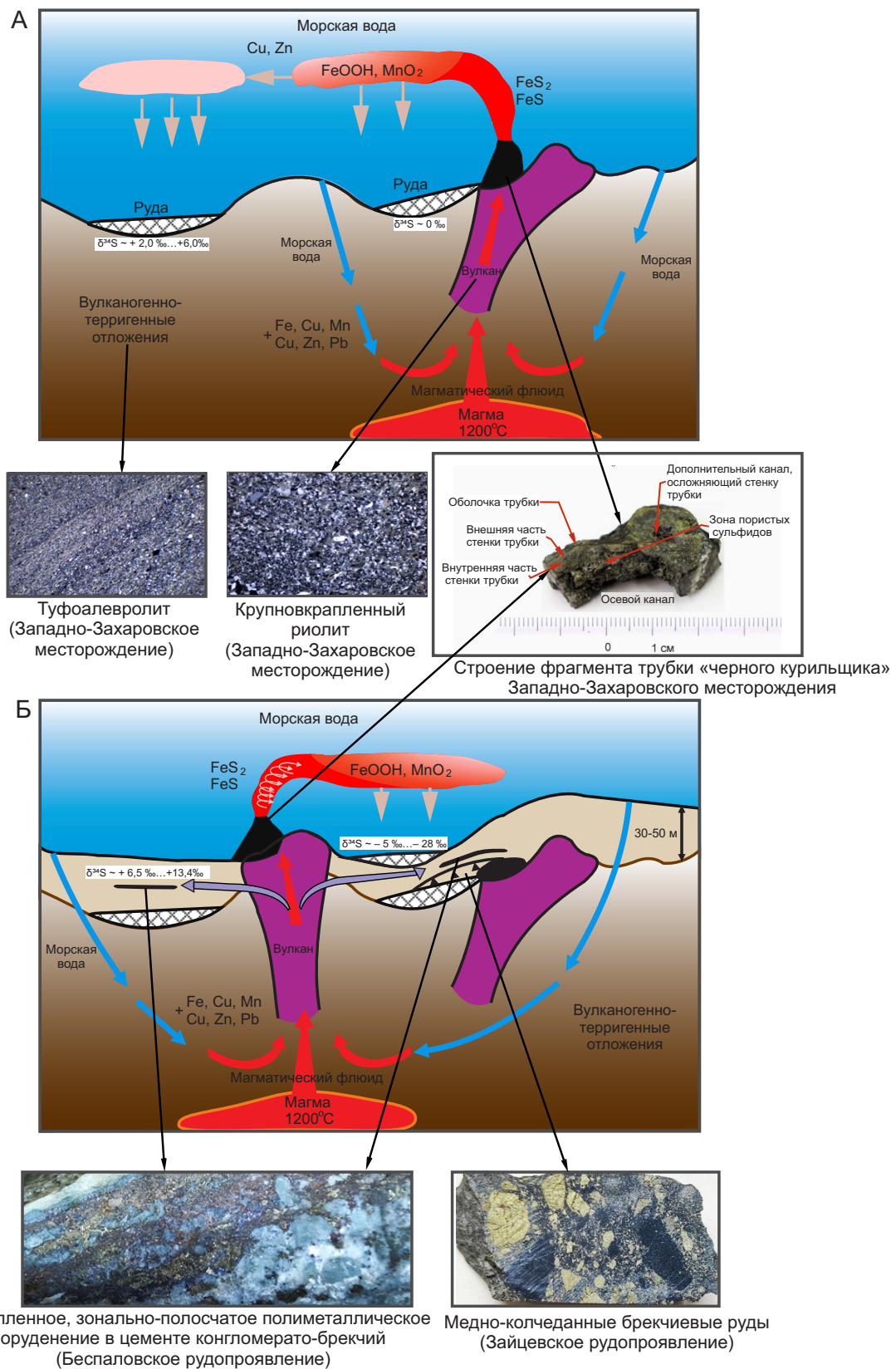


Рис. 11. Механизмы формирования месторождений типа VMS Большого Алтая. С использованием материалов [31, 32, 46, 65, 68, 69, 74, 75]

товые, карбонатные) свидетельствуют о замещении проницаемых горизонтов. Этот механизм особенно характерен для руд, ассоциирующих с риолит-кремнисто-терригенными фациями, которые обладают необходимой пористостью и проницаемостью для инфильтрации флюидов. Сульфидные руды отличаются утяжелённым изотопным составом серы ($\delta^{34}\text{S}$ от +6,5 до +13,4 ‰) и широким разбросом значений с ярко выраженной асимметрией в положительную сторону. Такой геохимический облик возникает в результате термохимического восстановления сульфата морской воды в замкнутых или полужамкнутых поровых системах под поверхностью дна. Это кардинально отличает руды придонного замещения от высокотемпературных труб «чёрных курильщиков», которым свойственен узкий диапазон.

Этажное строение рудных тел колчеданно-полиметаллических месторождений Большого Алтая (рис. 12) является одним из наиболее информативных критериев при реконструкции условий их формирования, однозначно свидетельствуя в пользу длительной и многостадийной эволюции палеогидротермальных систем на фоне непрерывного вулканизма. Наличие нескольких рудных этажей, приуроченных к различным стратиграфическим уровням, убедительно доказывает пульсационный характер рудоотложения, где каждая последующая залежь знаменует собой возобновление деятельности рудоподводящих каналов после периода накопления вмещающих пород. Тектонические подвижки, сопровождающие вулканизм, приводили к периодическому «распечатыванию» подводящих каналов, что позволяло новым порциям гидротерм подниматься выше и формировать залежи на более высоких стратиграфических уровнях.

После основного девонского вулканогенно-осадочного этапа в карбон-пермо-триасовое время регион был охвачен интенсивными деформациями и региональным метаморфизмом. Это привело к тектоническому дислоцированию первичных рудных тел, их частичной перекристаллизации и ремобилизации рудных компонентов метаморфогенными флюидами с высоким содержанием CO_2 . Результатом стало формирование эпигенетических жильных зон, скарнирование и создание сложных комбинированных месторождений (типа VMS-скарновое). Интенсивный региональный метаморфизм (зеленосланцевая фация в казахстанском секторе, амфиболитовая – в китайском)

привёл к перекристаллизации, рассланцеванию и ремобилизации рудного вещества.

Это проявилось в образовании гранобластовых, катакластических текстур (раздел «Минеральный состав руд»), в формировании эпигенетических жил и скарнов (районы Келан, Майзи). Характерно, что на месторождениях с умеренным метаморфизмом (Корбалихинское, Риддер-Сокольское) сохранились первичные текстуры и высокие концентрации металлов, тогда как при сильном метаморфизме (Кекетале, Савуси) происходит частичное перераспределение металлов, образование скарнов и снижение промышленных параметров.

Образование крупных, экономически значимых скоплений руд в отличие от мелких и непромышленных проявлений обусловлено совокупностью благоприятных факторов, действовавших преимущественно на стадии сингенетического гидротермального рудообразования. Во-первых, крупные месторождения (такие как Риддер-Сокольское, Новоленинское, Малеевское, Орловское, Корбалихинское, Ашеле, Кекетале и другие) формировались в рамках долгоживущих и устойчивых гидротермальных систем, питаемых мощными и длительно существовавшими магматическими очагами. Это обеспечивало непрерывный или многопульсовый приток больших объёмов обогащённых металлами флюидов к локусу рудоотложения, тогда как мелкие проявления связаны с кратковременными или эпизодическими гидротермальными импульсами. Во-вторых, максимальное накопление сульфидов происходило в локальных депрессиях морского дна (кальдерах, рифтовых впадинах), где фокусировался вынос флюидов, а также в высокопроницаемых горизонтах под дном (пористых туфах, брекчиях), способствовавших масштабному придонному замещению. Эффективность этих структурно-литологических ловушек определяла степень концентрации металлов, тогда как их отсутствие или несовершенство приводило к рассеиванию рудного вещества. В-третьих, крупное рудообразование требовало специфических и стабильных физико-химических условий – определённого диапазона температур, восстановленности, pH и активности серы во флюидах, что способствовало эффективному транспорту и массовому осаждению металлов. Сопоставление данных по $\delta^{34}\text{S}$ показывает, что крупные объекты характеризуются широким, но непрерывным диапазоном значений (от -15 до

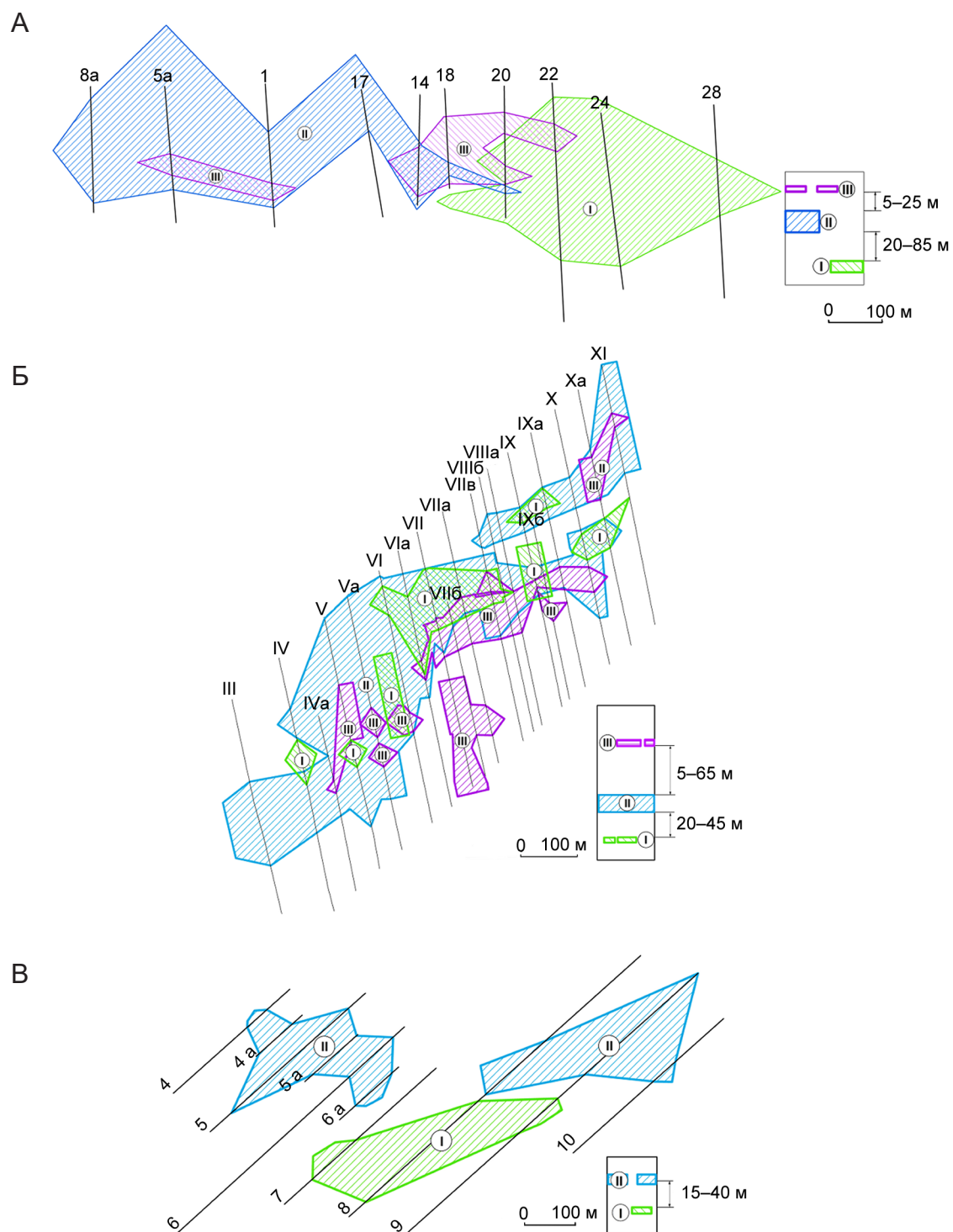


Рис. 12. Проекция рудных тел на горизонтальную поверхность:
месторождения: А – Лазурское, Б – Степное, В – Новозолотушинское

+9,8 ‰), свидетельствующим о длительном смешении магматогенного, биогенного и морского источников серы, тогда как мелкие рудопрооявления часто имеют либо узкий интервал $\delta^{34}\text{S}$, близкий к магматогенному, либо резко отрицательные значения без положительных «хвостов», что указывает на кратковременные импульсы или локальную биогенную продукцию.

Влияние последующих метаморфических процессов на масштабы оруденения было нелинейным. Умеренный метаморфизм способствовал ремобилизации и переотложению рассеянных металлов с образованием дополнительных эпигенетических жил (как на месторождении Кекетале). Однако интенсивный региональный метаморфизм, особенно в сочетании с сильной тектонической дислокацией (скалчатостью, сдвигами), часто приводил к фрагментации, бластезу и дисперсии первичных рудных тел, их частичному растворению и перераспределению металлов в нерудные минералы, что в конечном итоге снижало общие запасы и промышленную ценность проявления. Этим может объясняться относительно малый масштаб некоторых сильно метаморфизованных полиметаллических объектов.

Основные выводы.

1. Рудовмещающие толщи колчеданно-полиметаллических месторождений Рудноалтайской металлогенической зоны представлены вулканогенно-осадочными комплексами девонского возраста, сформированными в рифтогенных обстановках. Для российского и казахстанского секторов характерны формации контрастного базальт-риолитового состава с широким развитием кремнисто-терригенных пород; для китайского – повышенная метаморфическая переработка, выражающаяся в образовании сланцев и скарнов.

2. Основу оруденения во всех районах составляют пирит, сфалерит, галенит и халькопирит, однако количественные соотношения металлов различаются. Установлены четыре минеральных типа колчеданно-полиметаллических месторождений, состав разреза (рудоносных ассоциаций фаций) – от галенит-сфалерит-баритового ((риолит)-известняково-терригенные фации), галенит-сфалеритового пиритсодержащего (риолит-кремнисто-(карбонатно)-алевролитовые фации), халькопирит-галенит-сфалерит-пиритового (базальт-риолит-(карбонатно, углеродисто)-кремнистые фации) до (галенит)-халькопирит-сфалерит-пиритового (терригенно-базальт-риолитовые фации). Вто-

ростепенные минералы (блёклые руды, пирротин, магнетит, арсенопирит) маркируют локальные особенности и степень метаморфизма.

3. На основе созданной из 1687 анализов базы данных установлен широкий диапазон $\delta^{34}\text{S}$ сульфидов (от -28,17 до +13,4 ‰) и сульфатов (от +14,75 до +24,5 ‰). Выявлены три основных источника серы: магматогенный (0...+6 ‰), биогенный (-5...-28 ‰) и морских сульфатов (+14,8...+24,5 ‰). Максимальная вариабельность $\delta^{34}\text{S}$ и экстремально отрицательные значения характерны для китайской части (рудные районы Келан, Майзи), указывая на значительную роль биогенной сульфатредукции, тогда как в российско-казахстанских районах доминирует магматогенный источник. При этом большинство крупнейших и уникальных месторождений характеризуются широким диапазоном значений $\delta^{34}\text{S}$ – от -15 до +9,8 ‰ (Риддер-Сокольное, Корбалихинское, Новоленинское, Кекетале, Ашеле), что указывает на геотерогенный источник серы.

4. Формирование месторождений типа VMS Большого Алтая является результатом сочетания сингенетичного гидротермально-осадочного рудообразования на морском дне по механизму «чёрных курильщиков», процессов придонного замещения в проницаемых горизонтах, а также метаморфических преобразований, сопровождавшихся ремобилизацией рудного вещества и формированием эпигенетических жил и скарнов. Крупные месторождения сформировались в долгоживущих гидротермальных системах с устойчивым подводом металлов, в благоприятных структурно-литологических ловушках, при последующем умеренном метаморфизме. Мелкие рудопрооявления связаны с кратковременными гидротермальными импульсами или интенсивными дислокационными процессами, приведшими к дисперсии оруденения.

5. Выявленные закономерности (петрографические, минералогические, изотопно-геохимические) могут быть использованы при прогнозировании и поисках новых объектов типа VMS не только в пределах Большого Алтая, но и других металлогенических зонах, а также при переоценке известных рудопрооявлений.

6. Дальнейшие исследования целесообразно направить на сравнение обстановок формирования колчеданно-полиметаллических месторождений в пределах Рудноалтайской металлогенической зоны с объектами смежных зон Алтае-Саянской

складчатой области, в частности Салаирской и Улугуйской, а также Иберийского пиритового

(колчеданного) пояса (Португалия, Испания) и района Батерст (Канада).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Авдонин В. В. Реликты черных курильщиков в рудах гидротермальных месторождений // Металлогения складчатых систем с позиции тектоники плит. – Екатеринбург : УрО АН СССР, 1996. – С. 148–152.
2. Авдонин В. В. Этапы формирования и зональность окколрудных пород Тишинского колчеданно-полиметаллического месторождения на Рудном Алтае // Геология рудных месторождений. – 1976. – № 1. – С. 94–101.
3. Авдонин В. В., Воинков Д. М., Гриненко Л. Н., Дёмин Ю. И. Изотопный состав серы сульфидов различных групп месторождений Лениногорского района (Рудный Алтай) // Геология рудных месторождений. – 1972. – № 14(3). – С. 31–44.
4. Авдонин В. В., Дергачев А. Л., Сергеева Н. Е. Гидротермальные постройки и продукты их разрушения на колчеданно-полиметаллических месторождениях Рудного Алтая // Продукты разрушения гидротермальных построек в колчеданосных районах. – Свердловск : УрО АН СССР, 1991. – С. 126–137.
5. Авдонин В. В., Сергеева Н. Е. Реликты придонной фауны в рудах колчеданных месторождений // Отечественная геология. – 2021. – № 3–4. – С. 11–17.
6. Аксенов В. С., Гриненко Л. Н., Гриненко В. А. Изотопы серы и вопросы генезиса руд полиметаллических месторождений Зырянского района // Проблемы вопросы генезиса сульфидных генезиса колчеданно-полиметаллических месторождений Рудного Алтая / Под ред. Абдулина А. А. – Алма-Ата : Наука, 1977. – С. 153–158.
7. Байбатша А. Б., Дюсембаева К. Ш., Ганженко Г. Д. О богатых золотосодержащих рудах глубоких горизонтов месторождения Риддер-Сокольное // Материалы Международной научно-практической конференции «Сатпаевские чтения». – Алматы, 2009. – С. 161–167.
8. Беспяев Х. А. Атлас месторождений полезных ископаемых Казахстана. – Алматы, 2004. – 141 с.
9. Бестемьянова К. В. Минеральный состав, возраст и генезис барит-полиметаллических месторождений Змеиногорского рудного района (Рудный Алтай) : специальность 1.6.10 «Геология, поиски и разведка твёрдых полезных ископаемых, минерагения» : автореф. дис. на соискание учёного степен. канд. геол.-минерал. наук / Ксения Викторовна Бестемьянова. – Томск, 2025. – 255 с.
10. Вейц Б. И. О генетической связи полиметаллического оруденения Рудного Алтая с девонским вулканизмом // Изв. АН СССР. Сер. геол. – 1953. – № 7. – С. 105–115.
11. Викентьев И. В. Метаморфогенные структуры Тишинского месторождения (Рудный Алтай) // Геология рудных месторождений. – 1987. – Т. 29, № 1. – С. 66–76.
12. Викентьев И. В. Условия формирования и метаморфизм колчеданных руд. – М. : Научный мир, 2004. – 340 с.
13. Викентьев И. В., Карманов В. П. Два структурно-геохимических типа полиметаллических месторождений в Лениногорском рудном районе // Изв. вузов. Геология и разведка. – 1989. – № 8. – С. 48–57.
14. Викентьев И. В., Куйбида М. Л., Яковлев В. А. Рудноалтайский колчеданно-полиметаллический пояс (Россия, Казахстан) и факторы его формирования // Геология рудных месторождений. – 2024. – Т. 66, № 6. – С. 567–603.
15. Волков А. Б. Геологическая структура и условия образования полиметаллического месторождения Чекмарь (Рудный Алтай) : специальность 04.00.11 «Геология металлических и неметаллических полезных ископаемых» : автореф. дис. на соискание учёного степен. канд. геол.-минерал. наук / Андрей Борисович Волков. – М., 1995. – 25 с.
16. Ганженко Г. Д., Юдовская М. А., Викентьев И. В. Золото-полиметаллическая минерализация Риддер-Сокольного месторождения на Рудном Алтае (Восточный Казахстан) // Минералогия. – 2018. – № 4 (1). – С. 8–31.

17. Гаськов И. В. Колчеданно-полиметаллические месторождения северо-западной части рудного Алтая: условия образования и закономерности размещения : специальность 25.00.11 «Геология, поиски и разведка твердых полезных ископаемых, минерагения» : автореф. дис. на соискание учён. степ. докт. геол.-минерал. наук / Иван Васильевич Гаськов. – Новосибирск, 2002. – 336 с.
18. Горжевский Д. И., Чекваидзе В. Б., Исакович И. З. Типы полиметаллических месторождений Рудного Алтая, их происхождение и методы поисков. – М. : Недра, 1977. – 197 с.
19. Гриненко В. А., Гриненко Л. Н. Геохимия изотопов серы. – М. : Наука, 1974. – 274 с.
20. Дергачев А. Л., Пак Т. М., Еремин Н. И. О природе рудовмещающих купольных структур на Риддер-Сокольном месторождении на Рудном Алтае // ДАН. – 1994. – Т. 334, № 4. – С. 476–480.
21. Дробышевский М. И. Белоусовское месторождение // Металлогения Казахстана. – Алма-Ата, 1978. – С. 66–71.
22. Дурнев Г. С. Особенности морфологии и внутреннего строения рудных тел Тишинского колчеданно-полиметаллического месторождения // Сборник трудов. – Усть-Каменогорск, 1999. – С. 72–87.
23. Дьячков Б. А., Мизерная М. А., Пяткова А. П., Бисатова А. Е., Мирошникова А. П., Кузьмина О. Н., Зимановская Н. А., Ойцева Т. А., Черненко З. И. К проблеме формирования колчеданно-полиметаллических месторождений Рудного Алтая // Отечественная геология. – 2021. – № 5. – С. 3–16.
24. Еремин Н. И., Дергачев А. Л., Позднякова Н. В., Сергеева Н. Е. Крупные и особо крупные колчеданные месторождения вулканической ассоциации // Геология рудных месторождений. – 2004. – Т. 46, № 2. – С. 107–127.
25. Заири Н. М., Кузнецов В. В., Филатов Е. И., Гуркина Н. В. Опыт использования данных по изотопному составу серы при реконструкции условий формирования руд Корбалихинского месторождения (Рудный Алтай) // Геохимия. – 1986. – № 7. – С. 997–1005.
26. Зикирова К. Т. Оценка инвестиционной привлекательности рудных районов Восточного Казахстана, перспективных на восполнение минерально-сырьевой базы цветных и благородных металлов : специальность 8D0720 : диссертационная работа на соискание учёной степени доктора философии (PhD). – Усть-Каменогорск, 2025. – 234 с.
27. Иванкин П. Ф. Полиметаллические месторождения Прииртышья. – М. : Госгеолтехиздат, 1957. – 247 с.
28. Каюпов А. К., Ким В. А., Никитина Л. Г., Флеров Е. А. Геология Зыряновского полиметаллического месторождения // Полиметаллические месторождения Рудного Алтая. – 1957. – С. 213–360.
29. Кудрявцева Н. Г., Кузнецов В. В., Серавина Т. В., Иваненкова Е. В. Структурно-формационное и металлогеническое районирование Большого Алтая // Отечественная геология. – 2025. – № 2. – С. 50–60.
30. Кузнецов В. В., Кудрявцева Н. Г., Серавина Т. В., Мурзин О. В., Корчагина Д. А., Кузнецова С. В., Миляев С. А. Основы прогноза и поисков колчеданно-полиметаллических месторождений Рудного Алтая. – М. : ЦНИГРИ, 2019. – 206 с.
31. Кузнецова С. В. Структурно-текстурные признаки гидротермально-осадочного происхождения руд колчеданно-полиметаллических месторождений Змеиногорского и Рубцовского районов Рудного Алтая : специальность 1.6.10 «Геология, поиски и разведка твёрдых полезных ископаемых, минерагения» : автореф. дис. на соискание учён. степ. канд. геол.-минерал. наук / Светлана Владимировна Кузнецова. – М., 2023. – 171 с.
32. Кузнецова С. В., Серавина Т. В. Условия локализации, особенности вещественного состава руд и строение сульфидного холма Западно-Захаровского месторождения (Рудноалтайская минерагеническая зона) // Геология и охрана недр. – 2020. – № 1. – С. 19–30.
33. Лапухов А. С., Доильницын Е. Ф., Каныгин А. А., Карманов В. П., Кудряшов А. М. О полигенности рудноалтайских колчеданно-полиметаллических месторождений по данным изотопного состава серы // Изотопные исследования процессов рудообразования. – Новосибирск : Наука, 1991. – С. 41–56.
34. Лапухов А. С., Прокопенко А. И., Иванов Н. Б., Трубников Л. М. Рудообразующие системы колчеданно-полиметаллических месторождений зон смятия (Рудный Алтай). – Новосибирск : Наука, 1986. – 193 с.
35. Маньков Б. В. Морфология рудных тел и распределение оруденения на Тишинском месторождении // Изв. АН КазССР. Сер. геол. – 1964. – № 1. – С. 29–45.
36. Ойцева Т. А., Бисатова А. Е., Зинякин С. С. Модель геодинамического развития Большого Алтая // Труды университета имени Д. Серикбаева. – 2023. – № 3 (92). – С. 122–127.
37. Покровская И. В. Металлогения и условия образования полиметаллических месторождений. Лениногорский район Рудного Алтая. – Алма-Ата : Наука, 1982. – 156 с.
38. Покровская И. В., Дюсембаева К. Ш. Новые данные о генезисе и возрасте руд Тишинского месторождения // Геология рудных месторождений. – 1986. – Т. 28, № 3. – С. 47–60.
39. Половникова Л. М., Кузнецов В. В., Серавина Т. В. Отчет о результатах работ по объекту «Специализированные геолого-геохимические работы на золото-серебросодержащее полиметаллическое оруденение в пределах Новокузнецкой площа-

- ди в Змеиногорском рудном районе (Алтайский край)» (Договор №109/2015-ЮЛ/2 от 10.07.2015 г.). – М., 2017. – 228 с.
40. Попов В. В. Вулканизм, тектоника и полиметаллическое оруденение Лениногорского рудного района. – Ала-Ата : Наука, 1968. – 173 с.
 41. Пяткова А. П., Мизерная М. А., Мирошникова А. П., Черненко З. И. Особенности формирования VMS месторождений в Рудном Алтае на примере месторождений Артемьевское и Малеевское // Корреляция Алтаид и Уралид. – Новосибирск : Издательство СО РАН, 2018. – С. 120–121.
 42. Ручкин Г. В., Конкин В. Д., Кузнецов В. В., Пугачева И. П. Параметрические геолого-поисковые модели колчеданно-полиметаллических месторождений. – М. : ЦНИГРИ, 1992. – 150 с.
 43. Сайдуакасов М. С. Геологическое строение центральной части Зырянского рудного района и его прогнозная оценка на колчеданно-полиметаллическое оруденение : автореф. дис. на соискание учён. степ. канд. геол.-минерал. наук. – Астана, 2002. – 220 с.
 44. Серавина Т. В. Некоторые особенности формирования колчеданно-полиметаллических месторождений типа VMS Большого Алтая // Отечественная геология. – 2025. – № 5. – С. 16–45.
 45. Серавина Т. В., Кузнецов В. В., Кряжев С. Г. Информационный геологический отчет о результатах и объемах работ, выполненных за 2025 г. по объекту «Изучение вещественного состава рудовмещающих пород, околорудных метасоматитов, медно-свинцово-цинковой (с попутным золотом и серебром) минерализации Западно-Захаровской площади (Алтайский край)» (Договор № ВВ-2/24 от 14.06.2024 г.). – М., 2025. – 119 с.
 46. Серавина Т. В., Кузнецов В. В., Кузнецова С. В., Филатова Л. К., Иваненкова Е. В. Колчеданно-полиметаллическое оруденение Рудного Алтая типа VMS на примере Зайцевского рудного поля (Змеиногорский рудный район) // Отечественная геология. – 2025. – № 2. – С. 3–21.
 47. Серавина Т. В., Кузнецова С. В., Филатова Л. К. Особенности вещественного состава вмещающих пород и руд Лазурского рудного поля (Змеиногорский рудный район, Рудноалтайская минерагеническая зона) // Отечественная геология. – 2021. – № 3–4. – С. 36–47.
 48. Серавина Т. В., Кузнецова С. В., Филатова Л. К., Донец А. И., Конкин В. Д. Особенности локализации колчеданно-полиметаллических руд Тушканихинского месторождения (Рудный Алтай) // Руды и металлы. – 2022. – № 4. – С. 102–118.
 49. Хисамутдинов М. Г. Металлогения и полиметаллические месторождения Рудного Алтая. – Ленинград, 1978. – 195 с.
 50. Чекалин В. М. Геолого-генетическая модель Корбалихинского месторождения полиметаллических и колчеданных руд на Рудном Алтае // Геология и геофизика. – 1985. – № 8. – С. 78–91.
 51. Чекалин В. М. Основные закономерности размещения и принципиальная модель формирования колчеданно-полиметаллических месторождений северо-западной части Риддер-Сокольного месторождения // Геология и геофизика. – 1991. – № 10. – С. 75–89.
 52. Чекалин В. М. Рубцовское месторождение полиметаллических руд на северо-западе Рудного Алтая: условия образования // Большой Алтай – уникальная редкометалльно-золото-полиметаллическая провинция Центральной Азии. Международный геологический конгресс МГК34 : доклады геологов стран Центральной Азии. – Алматы, 2012. – С. 253–266.
 53. Чекваидзе В. Б., Исакович И. З. Условия формирования послемагматической минерализации Тишинского месторождения // Советская геология. – 1971. – № 6. – С. 106–123.
 54. Чепрасов Б. А., Покровская И. В., Ковриго О. А. О полигенном характере оруденения Риддер-Сокольного месторождения // Геология рудных месторождений. – 1972. – № 6. – С. 30–45.
 55. Чернышев И. В., Викентьев И. В., Чугаев А. В. Источники металлов колчеданных месторождений Рудного Алтая по данным высокоточного MS-ICP-MS изучения изотопного состава свинца // Геохимия. – 2023. – Т. 68, № 6. – С. 545–569.
 56. Шатобин А. А. О взаимоотношениях метаморфических процессов и оруденения на Греховском рудном поле (Рудный Алтай) // Геология и геофизика. – 1977. – № 7. – С. 138–144.
 57. Щерба Г. Н., Беспяев Х. А., Дьячков Б. А. Большой Алтай (геология и металлогения). Кн. 2. Металлогения. – Алматы : РИО ВАК РК, 2000. – 400 с.
 58. Щерба Г. Н., Дьячков Б. А., Нахтигаль Г. П. Металлогения Рудного Алтая и Калбы. – Алма-Ата : Наука, 1984. – 240 с.
 59. Юдовская М. А. Минералого-геохимические особенности и условия формирования руд Малеевского месторождения на Рудном Алтае : специальность 04.00.11 «Геология, поиски и разведка рудных и нерудных месторождений, металлогения» : автореф. дис. на соискание учён. степ. канд. геол.-минерал. наук / Марина Александровна Юдовская. – М., МГУ. – 1995. – 31 с.
 60. Юдовская М. А., Гриненко Л. Н., Еремин Н. И. Генезис Малеевского колчеданно-полиметаллического месторождения (Рудный Алтай, Казахстан) // Геология рудных месторождений. – 1997. – Т. 39, № 2. – С. 163–182.
 61. Яковлев Г. Ф., Авдонин В. В. Закономерности размещения колчеданно-полиметаллических месторождений на Рудном Алтае // Изв. ВУЗов. Геология и разведка. – 1986. – № 11. – С. 27–39.

62. Январев Г. С. Особенности геологического строения и минерализации колчеданно-полиметаллического месторождения Чекмарь на Рудном Алтае // Геология рудных месторождений. – М., 1979. – Т. XXI. – С. 88–93.
63. Bian C. J., Xu J. H., Chen D. P., Zhang H., Cheng X. H. A fluid inclusion study of vein-type copper mineralization in the east Wulasigou Pb–Zn–Cu deposit, Altay, northwestern China // *Acta Geol. Sin. (ENGL)*. – 2016. – № 90 (5). – P. 1754–1767.
64. Chai F., Jingwen M., Lianhui D., Yang F., Liu F., Geng X., Zhang Z. Geochronology of metarhyolites from the Kangbutiebao Formation in the Kelang basin, Altay Mountains, Xinjiang: Implications for the tectonic evolution and metallogeny // *Gondwana Research*. – 2009. – № 16. – P. 189–200.
65. Franklin J. M., Gibson H. L., Jonasson I. R., Galley A. G. Volcanogenic massive sulfide deposits // *Economic Geology 100th anniversary volume, 1905–2005*. – 2005. – P. 523–560.
66. Gao L.-L., Chen C., Wang K.-Y., Zhanga X.-B., Li S.-D. Tectonic setting and geochronology of the Sarsuk Au polymetallic deposit in Xinjiang, NW China: Constraints from pyrite Re–Os, zircon U–Pb dating and Hf isotopes // *Ore Geol. Rev.* – 2020. – 124.
67. Geng X. X., Yang F. Q., Yang J. M., Guo Z. L., Guo X. J., Huang C. K., Liu F., Chai F. M., Zhang Z. X. Stable isotope characteristics of Tiemurte Pb–Zn deposit in Altay, Xinjiang // *Mineral Deposits*. – 2010. – 29. – P. 1088–1100.
68. Gibson H. L., Galley A. G. Volcanogenic massive sulphide deposits of the Archean, Noranda district, Québec // *Mineral deposits of Canada – A synthesis of major deposit-types, district metallogeny, the evolution of geological provinces, and exploration methods: Geological Association of Canada. – Mineral Deposits Division*. – 2007. – Special Publication 5. – P. 533–552.
69. Hannington M. D., de Ronde C. E. J., Petersen S. Seafloor tectonics and submarine hydrothermal systems // *Economic Geology 100th anniversary volume 1905–2005: Littleton, Colo., Society of Economic Geologists*. – 2005. – P. 111–141.
70. Li D.-F., Chen H.-Y., Hollings P., Li Z., Sun X.-M., Zheng Y., Xia X.-P., Xiao B., Wang C.-M., Fang J. Trace element geochemistry of magnetite: Implications for ore genesis of the Talate skarn Pb–Zn (–Fe) deposit, Altay, NW China // *Ore Geol. Rev.* – 2018. – 100. – P. 471–482.
71. Li Q., Yang F., Zhang Z., Geng X., Liu F., Chai F. Geology and geochemistry of the submarine volcanism-related Qi Xia Fe–Cu deposit in the southern Altay, Xinjiang, Central Asian Orogenic Belt // *Ore Geol. Rev.* – 2021. – 128.
72. Liu X., Liu W., Liu L. The generation of a stratiform skarn and volcanic exhalative Pb–Zn deposit (Sawusi) in the southern Chinese Altay Mountains: The constraints from petrography, mineral assemblage and chemistry. *Gondwana Research*. – 2012. – № 22. – P. 597–614.
73. Niu L., Hong T., Xu X. W., Li H., Ke Q., Wang X. H., Ma Y. C. A revised stratigraphic and tectonic framework for the Ashele volcanogenic massive sulfide deposit in the southern Chinese Altay: Evidence from stratigraphic relationships and zircon geochronology // *Ore Geol. Rev.* – 2020. – 127. – 103814.
74. Piercey S. J. A semipermeable interface model for the genesis of seafloor replacement type volcanogenic massive sulfide (VMS) deposits // *Economic Geology*. – 2015. – V. 110. – P. 1655–1660.
75. Shanks W. C., Pat III, Thurston R. Volcanogenic massive sulfide occurrence model // *U.S. Geological Survey Scientific Investigations Report*. – 2010. – 5070. – 345 p.
76. Sun C., Yang X. Y., Zhang H. S., Ji W. H., Chen B., Dong Z. C., Faisal M., Xi D. H. Tracing the formation and modification of the Keketale VMS-type Pb–Zn deposit, Altai Mountains: insights from ore deposit geology, geochronology, and magnetite geochemistry // *Ore Geol. Rev.* – 2022. – 144.
77. Sun C., Zhang H., Yang X., Ji W., Chen B., Li Y., Dong Z. C., Faisal M. A tale of elemental accumulation and recycling in the metamorphosed Keketale VMS-type Pb–Zn deposit, Altai Mountains // *Geoscience Frontiers*. – 2023. – 14. – Is. 1. – P. 101481.
78. Sun C., Zhang H., Yang X., Ji W. H., Chen B., Li Y., Dong Z. C., Faisal M., He Z. The role of long-lived arc volcanism in the formation of the VMS deposits: A case study of the volcanic-sedimentary sequence of Kangbutiebao formation associated with VMS deposits, Altai Mountains // *Gondwana Research*. – 2023. – № 118. – P. 194–217.
79. Wan B., Zhang L. C., Xiang P. The Ashele VMS-type Cu–Zn Deposit in Xinjiang, NW China Formed in a Rifted Arc Setting // *Resource Geology*. – 2010. – № 60 (2). – P. 150–164.
80. Wan B., Zhang L. C., Xiao W. J. Geological and geochemical characteristics and ore genesis of the Keketale VMS Pb–Zn deposit, Southern Altai Metallogenic Belt, NW China // *Ore Geol. Rev.* – 2010. – 37 (2). – P. 114–126.
81. Wang D. H., Chen Y. C., Mao J. W. The Ashele deposit: A recently discovered Volcanogenic Massive Sulfide Cu–Zn deposit in Xinjiang, China // *Resource Geology*. – 1998. – 48 (1). – P. 31–42.
82. Wang J. B., Qin K. Z., Wu Z. L., Hu J. H., Deng J. N. Volcanic-exhalative-sedimentary lead zinc deposit in the southern margin of the Altai, Xinjiang. – Beijing: Geology Publishing House, 1998. – P. 1–210.
83. Wu Y., Yang F., Liu F., Geng X., Li Q., Zheng J. Petrogenesis and tectonic settings of volcanic rocks of the Ashele Cu–Zn deposit in southern Altay, Xinjiang, Northwest China: Insights from zircon U–Pb geo-

- chronology, geochemistry and Sr–Nd isotopes // *Journal of Asian Earth Sciences*. – 2015. – № 112. – P. 60–73.
84. Yang C. D., Geng X., Yang F., Qiang Li. Metallogeny of the Sarsuk polymetallic Au deposit in the Ashele Basin, Altay Orogenic Belt, Xinjiang, NW China: Constraints from mineralogy, fluid inclusions, and He–Ar isotopes // *Ore Geol. Rev.* – 2018. – № 100. – P. 77–98.
 85. Yang C. D., Zhang B., Yang F. Q., Li Q., Wang Y. Q. Zircon U–Pb age, fluid inclusion, and H–C–O–He–Ar–S isotopic compositions as an index to the VMS type mineralization: a case study from the Wulashan polymetallic deposit, Altay Orogenic Belt, Northwest China // *J. Geochem. Explor.* – 2021. – 222.
 86. Yang F. Q., Geng X. X., Wang R., Zhang Z. X., Guo X. J. A synthesis of mineralization styles and geodynamic settings of the Paleozoic and Mesozoic metallic ore deposits in the Altay Mountains, NW China // *J. Asian Earth Sci.* – 2018. – № 159. – P. 233–258.
 87. Yang F. Q., Mao J. W., Liu F., Dong Y. G., Chai F. M., Geng X. X. Geological characteristics and metallogenesis of the Keyinbulake copper–zinc deposit in Altay, Xinjiang // *Acta Petrol. Sin.* – 2010. – № 26 (02). – P. 361–376.
 88. Yang F., Li Q., Yang C. D., Zhang Z. A combined fluid inclusion and S–H–O–He–Ar isotope study of the Devonian Ashele VMS-type copper–zinc deposit in the Altay orogenic belt, northwest China // *Journal of Asian Earth Sciences*. – 2018. – № 161. – P. 139–163.
 89. Yang F., Liu F., Li Q., Geng X. In situ LA–MC–ICP–MS U–Pb geochronology of igneous rocks in the Ashele Basin, Altay orogenic belt, northwest China: Constraints on the timing of polymetallic copper mineralization // *Journal of Asian Earth Sciences*. – 2014. – № 79. – P. 477–496.
 90. Yang J. J., Yang X. K., Yang C. D., Li Q., Yang F. Q. Genesis of the Talate Pb–Zn (–Fe) deposit in the Altay, Xinjiang, NW China: evidence from fluid inclusions and stable isotopes // *Ore Geol. Rev.* – 2022. – P. 144.
 91. Yang Y., Zhang H., Yang X., Sun C., Ren G., Li Y., Chen B., Jin M., Zhao X., Zhou N. Evolution of the hydrothermal ore-forming system of Ashele VMS-type Cu–Zn deposit in Xinjiang, NW China: Insights from mineralogy and geochemistry of sulfides // *Ore Geol. Rev.* – 2024. – P. 167.
 92. Yu P. P., Zheng Y. Pb–Zn–Cu accumulation from sea-floor sedimentation to metamorphism: constraints from ore textures coupled with elemental and isotopic geochemistry of the Tieshanzi in Chinese Altay Orogen, NW China // *Gondwana Res.* – 2019. – № 72. – P. 65–82.
 93. Yuan L., Liu F. Sulfide Re–Os age and Rb–Sr age of Talate Pb–Zn–Fe polymetallic deposit in Southern Altay and their geological significance // *Mineral Deposit.* – 2017. – № 36. – P. 1333–1351.
 94. Zhang L., Zheng Y., Chen Y.-J. Ore geology and fluid inclusion geochemistry of the Tieshanzi Pb–Zn–Cu deposit, Altay, Xinjiang, China: A case study of orogenic-type Pb–Zn systems // *Journal of Asian Earth Sciences*. – 2012. – № 49. – P. 69–79.
 95. Zhang W., Zhang X., Liu G., Guo X. Magmatic-seawater interaction in the Keyinbulake Zn–Cu deposit (NW China): Insight from sulfide S isotope and trace elements // *Ore Geol. Rev.* – 2026. – 188.
 96. Zheng Y., Wang Y., Chen H., Lin Z., Hou W., Li D. Micro-textural and fluid inclusion data constraints on metallic remobilization of the Ashele VMS Cu–Zn deposit, Altay, NW China // *Journal of Geochemical Exploration*. – 2016. – 171. – P. 113–123.
 97. Zheng Y., Zhang L., Li D.-F., Kapsiotis A., Chen Y.-J. Genesis of the Dadonggou Pb–Zn deposit in Kelan basin, Altay, NW China: Constraints from zircon U–Pb and biotite $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ geochronological data // *Ore Geol. Rev.* – 2015. – 64.

REFERENCES

1. Avdonin V. V. Relikty chernykh kuril'shchikov v rudakh gidrotermal'nykh mestorozhdeniy [Relics of black smokers in ores of hydrothermal deposits], Metallogeniya skladchatykh sistem s pozitsii tektoniki plit, Yekaterinburg, UrO AN SSSR publ., 1996, pp. 148–152. (In Russ.)
2. Avdonin V. V. Etapy formirovaniya i zonal'nost' okolorudnykh porod Tishinskogo kolchedanno-polimetallichesкого mestorozhdeniya na Rudnom Altaye [Stages of formation and zonality of near-ore rocks of the Tishinsky pyrite-polymetallic deposit in Rudny Altai], *Geologiya rudnykh mestorozhdeniy*, 1976, No. 1, pp. 94–101. (In Russ.)
3. Avdonin V. V., Voinkov D. M., Grinenko L. N., Domin Yu. I. Izotopnyy sostav cepy sul'fidov razlichnykh grupp mestorozhdeniy Leninogorskogo rayona (Rudnyy Altay) [Isotopic composition of sulfur of sulfides of different groups of deposits in the Leninogorsk region (Rudny Altai)], *Geologiya rudnykh mestorozhdeniy*, 1972, No. 14(3), pp. 31–44. (In Russ.)
4. Avdonin V. V., Dergachev A. L., Sergeyeva N. Ye. Gidrotermal'nyye postroyki i produkty ikh razru-

- sheniya na kolchedanno-polimetallicheskih mestorozhdeniyakh Rudnogo Altaya [Hydrothermal structures and products of their destruction at pyrite-polymetallic deposits of Rudny Altai], *Produkty razrusheniya gidrotermal'nykh postroyek v kolchedanonsnykh rayonakh, Sverdlovsk, UrO AN SSSR publ.*, 1991, pp. 126–137 (In Russ.)
5. *Avdonin V. V., Sergeyeva N. Ye.* Relikty pridonnoy fauny v rudakh kolchedannykh mestorozhdeniy [Relics of benthic fauna in ores of pyrite deposits], *Otechestvennaya geologiya*, 2021, No. 3–4, pp. 11–17. (In Russ.)
6. *Aksenov V. S., Grinenko L. N., Grinenko V. A.* Izo-topy sery i voprosy genezisa rud polimetallicheskih mestorozhdeniy Zyryanovskogo rayona [Sulfur isotopes and questions of genesis of ores of polymetallic deposits of Zyryanovsky district], *Problemy voprosy genezisa sul'fidnykh genezisa kolchedanno-polimetallicheskih mestorozhdeniy Rudnogo Altaya*, ed. *Abdulin A. A.*, Alma-Ata, Nauka publ., 1977, pp. 153–158. (In Russ.)
7. *Baybatsha A. B., Dyusembayeva K. Sh., Ganzhenko G. D.* O bogatykh zolotosoderzhashchikh rudakh glubokikh gorizontov mestorozhdeniya Ridder-Sokol'noye [On rich gold-bearing ores of deep horizons of the Ridder-Sokolnoye deposit], *Materialy Mezhdunarodnoy nauchno-prakticheskoy konferentsii "Satpayevskiy chteniya"*, Almaty, 2009, pp. 161–167. (In Russ.)
8. *Bespayev Kh. A.* Atlas mestorozhdeniy poleznykh iskopayemykh Kazakhstana [Atlas of mineral deposits of Kazakhstan], Almaty, 2004, 141 p. (In Russ.)
9. *Bestem'yanova K. V.* Mineral'nyy sostav, vozrast i genezis barit-polimetallicheskih mestorozhdeniy Zmeinogorskogo rudnogo rayona (Rudnyy Altay) [Mineral composition, age and genesis of barite-polymetallic deposits of the Zmeinogorsk ore region (Rudny Altai)], *Tomsk*, 2025, 255 p. (In Russ.)
10. *Veyts B. I.* O geneticheskoy svyazi polimetalliches-kogo orudeneniya Rudnogo Altaya s devonskim vulkanizmom [On the genetic relationship of polymetallic mineralization of Rudny Altai with Devonian volcanism], *Izv. AN SSSR. Ser. geol.*, 1953, No. 7, pp. 105–115. (In Russ.)
11. *Vikent'yev I. V.* Metamorfogennyye struktury Tishinskogo mestorozhdeniya (Rudnyy Altay) [Metamorphogenic structures of the Tishinsky deposit (Rudny Altai)], *Geologiya rudnykh mestorozhdeniy*, 1987, V. 29, No. 1, pp. 66–76. (In Russ.)
12. *Vikent'yev I. V.* Usloviya formirovaniya i metamorfizm kolchedannykh rud [Conditions of formation and metamorphism of pyrite ores], *Moscow, Nauchnyy mir publ.*, 2004, 340 p. (In Russ.)
13. *Vikent'yev I. V., Karmanov V. P.* Dva strukturno-geokhimicheskikh tipa polimetallicheskih mestorozhdeniy v Leninogorskom rudnom rayone [Two structural-geochemical types of polymetallic deposits in the Leninogorsk ore region], *Izv. vuzov. Geologiya i razvedka*, 1989, No. 8, pp. 48–57. (In Russ.)
14. *Vikentiev I. V., Kuibida M. L., Yakovlev V. A.* Rudnoaltayskiy kolchedanno-polimetallicheskiy poyas (Rossiya, Kazakhstan) i faktory yego formirovaniya [The Rudno-Altai pyrite-polymetallic belt (Russia, Kazakhstan) and factors of its formation], *Geologiya rudnykh mestorozhdeniy*, 2024, V. 66, No. 6, pp. 567–603. (In Russ.)
15. *Volkov A. B.* Geologicheskaya struktura i usloviya obrazovaniya polimetallicheskogo mestorozhdeniya Chekmar' (Rudnyy Altay) [Geological structure and conditions of formation of the Chekmar polymetallic deposit (Rudny Altai)], *Moscow*, 1995, 25 p. (In Russ.)
16. *Ganzhenko G. D., Yudovskaya M. A., Vikent'yev I. V.* Zoloto-polimetallicheskaya mineralizatsiya Ridder-Sokol'nogo mestorozhdeniya na Rudnom Altaya (Vostochnyy Kazakhstan) [Gold-polymetallic mineralization of the Ridder-Sokolnoye deposit in Rudny Altai (Eastern Kazakhstan)], *Mineralogiya*, 2018, No. 4 (1), S 8–31. (In Russ.)
17. *Gas'kov I. V.* Kolchedanno-polimetallicheskiye mestorozhdeniya severo-zapadnoy chasti rudnogo Altaya: usloviya obrazovaniya i zakonomernosti razmeshcheniya [Pyrite-polymetallic deposits of the northwestern part of the Ore Altai: conditions of formation and patterns of placement], *Novosibirsk*, 2002, 336 p. (In Russ.)
18. *Gorzhhevskiy D. I., Chekvaidze V. B., Isakovich I. Z.* Tipy polimetallicheskih mestorozhdeniy Rudnogo Altaya, ikh proiskhozhdeniye i metody poiskov [Types of polymetallic deposits of Rudny Altai, their origin and prospecting methods], *Moscow, Nedra publ.*, 1977, 197 p. (In Russ.)
19. *Grinenko V. A., Grinenko L. N.* Geokhimiya izotopov sery [Geochemistry of sulfur isotopes], *Moscow, Nauka publ.*, 1974, 274 p. (In Russ.)
20. *Dergachev A. L., Pak T. M., Yeregin N. I.* O prirode rudovmeshchayushchikh kupol'nykh struktur na Ridder-Sokol'nom mestorozhdenii na Rudnom Altaye [On the nature of ore-bearing dome structures at the Ridder-Sokolnoye deposit in Rudny Altai], *DAN*, 1994, V. 334, No. 4, pp. 476–480. (In Russ.)
21. *Drobyshevskiy M. I.* Belousovskoye mestorozhdeniye [Belousovskoye deposit], *Metallogeniya Kazakhstana, Alma-Ata*, 1978, pp. 66–71. (In Russ.)
22. *Durnev G. S.* Osobennosti morfologii i vnutrennego stroyeniya rudnykh tel Tishinskogo kolchedanno-polimetallicheskogo mestorozhdeniya [Features of the morphology and internal structure of ore bodies of the Tishinsky pyrite-polymetallic deposit], *Sbornik trudov, Ust'-Kamenogorsk*, 1999, pp. 72–87. (In Russ.)
23. *Dyachkov B. A., Mizernaya M. A., Pyatkova A. P., Bisatova A. E., Miroshnikova A. P., Kuzmina O. N., Zimanovskaya N. A., Oitseva T. A., Chernenko Z. I.*

- K probleme formirovaniya kolchedanno-polimetallicheskih mestorozhdeniy Rudnogo Altaya [On the problem of formation of pyrite-polymetallic deposits of Rudny Altai], *Otechestvennaya geologiya*, 2021, No. 5, pp. 3–16. (In Russ.)
24. Yeremin N. I., Dergachev A. L., Pozdnyakova N. V., Sergeyeva N. Ye. Krupnyye i osobo krupnyye kolchedannyye mestorozhdeniya vulkanicheskoy assotsiatsii [Large and especially large pyrite deposits of volcanic association], *Geologiya rudnykh mestorozhdeniy*, 2004, V. 46. No. 2, pp. 107–127. (In Russ.)
 25. Zairi N. M., Kuznetsov V. V., Filatov Ye. I., Gurina N. V. Opyt ispol'zovaniya dannykh po izotopnomu sostavu sery pri rekonstruktsii usloviy formirovaniya rud Korbalikhinskogo mestorozhdeniya (Rudnyy Altay) [Experience of using data on the isotopic composition of sulfur in reconstructing the conditions of ore formation at the Korbalikhinskoye deposit (Rudny Altai)], *Geokhimiya*, 1986, No. 7, pp. 997–1005. (In Russ.)
 26. Zikirova K. T. Otsenka investitsionnoy privlekatel'nosti rudnykh rayonov Vostochnogo Kazakhstana, perspektivnykh na vospolneniye mineral'no-syr'yevoy bazy tsvetnykh i blagorodnykh metallov [Assessment of the investment attractiveness of ore regions of Eastern Kazakhstan, promising for replenishing the mineral resource base of non-ferrous and precious metals], *Ust-Kamenogorsk*, 2025, 234 p. (In Russ.)
 27. Ivankin P. F. Polimetallicheskiye mestorozhdeniya Priirtysh'ya [Polymetallic deposits of the Irtysh region], Moscow, Gosgeoltekhizdat publ., 1957, 247 p. (In Russ.)
 28. Kayupov A. K., Kim V. A., Nikitina L. G., Flerov Ye. A. Geologiya Zyryanovskogo polimetallicheskogo mestorozhdeniya [Geology of the Zyryanovsk polymetallic deposit], *Polimetallicheskiye mestorozhdeniya Rudnogo Altaya*, 1957, pp. 213–360. (In Russ.)
 29. Kudryavtseva N. G., Kuznetsov V. V., Seravina T. V., Ivanenkova Ye. V. Strukturno-formatsionnoye i metallogenicheskoye rayonirovaniye Bol'shogo Altaya [Structural-formational and metallogenic zoning of the Greater Altai], *Otechestvennaya geologiya*, 2025, No. 2, pp. 50–60. (In Russ.)
 30. Kuznetsov V. V., Kudryavtseva N. G., Seravina T. V., Murzin O. V., Korchagina D. A., Kuznetsova S. V., Milyayev S. A. Osnovy prognoza i poiskov kolchedanno-polimetallicheskih mestorozhdeniy Rudnogo Altaya [Fundamentals of forecasting and prospecting for pyrite-polymetallic deposits in Rudny Altai], Moscow, TSNIIGRI publ., 2019, 206 p. (In Russ.)
 31. Kuznetsova S. V. Strukturno-teksturnyye priznaki gidrotermal'no-osadochnogo proiskhozhdeniya rud kolchedanno-polimetallicheskih mestorozhdeniy Zmeinogorskogo i Rubtsovskogo rayonov Rudnogo Altaya [Structural and textural features of hydrothermal-sedimentary origin of ores of pyrite-polymetallic deposits of the Zmeinogorsk and Rubtsovsk regions of Rudny Altai], Moscow, 2023, 171 p. (In Russ.)
 32. Kuznetsova S. V., Seravina T. V. Usloviya lokalizatsii, osobennosti veshchestvennogo sostava rud i stroyeniye sul'fidnogo kholma Zapadno-Zakharovskogo mestorozhdeniya (Rudnoaltayskaya mineragenicheskaya zona) [Localization conditions, features of the material composition of ores and the structure of the sulfide hill of the Zapadno-Zakharovskoye deposit (Rudno-Altai mineragenic zone)], *Geologiya i okhrana nedr*, 2020, No. 1, pp. 19–30. (In Russ.)
 33. Lapukhov A. S., Doil'nitsyn Ye. F., Kanygin A. A., Karmanov V. P., Kudryashov A. M. O poligennosti rudnoaltayskikh kolchedanno-polimetallicheskih mestorozhdeniy po dannym izotopnogo sostava sery [On the polygeneity of the Ore-Altai pyrite-polymetallic deposits based on the isotopic composition of sulfur], *Izotopnyye issledovaniya protsessov rudoobrazovaniya*, Novosibirsk, Nauka publ., 1991, pp. 41–56. (In Russ.)
 34. Lapukhov A. S., Prokopenko A. I., Ivanov N. B., Trubnikov L. M. Rudoobrazuyushchiye sistemy kolchedanno-polimetallicheskih mestorozhdeniy zon smyatiya (Rudnyy Altay) [Ore-forming systems of pyrite-polymetallic deposits of shear zones (Rudny Altai)], Novosibirsk, Nauka publ., 1986, 193 p. (In Russ.)
 35. Man'kov B. V. Morfologiya rudnykh tel i raspredeleniye orudeneniya na Tishinskom mestorozhdenii [Morphology of ore bodies and distribution of mineralization at the Tishinskoye deposit], *Izv. AN KazSSR. Ser. geol*, 1964, No. 1, pp. 29–45. (In Russ.)
 36. Oytseva T. A., Bisatova A. Ye., Zinyakin S. S. Model' geodinamicheskogo razvitiya Bol'shogo Altaya [Model of geodynamic development of the Greater Altai], *Trudy universiteta imeni D. Serikbayeva*, 2023, No. 3 (92), pp. 122–127. (In Russ.)
 37. Pokrovskaya I. V. Metallogeniya i usloviya obrazovaniya polimetallicheskih mestorozhdeniy. Leninskoy rayon Rudnogo Altaya [Metallogeny and conditions for the formation of polymetallic deposits. Leninogorsk district of Rudny Altai], Alma-Ata, Nauka publ., 1982, 156 p. (In Russ.)
 38. Pokrovskaya I. V., Dyusembayeva K. Sh. Novyye dannyye o genezise i vozraste rud Tishinskogo mestorozhdeniya [New data on the genesis and age of ores of the Tishinsky deposit], *Geologiya rudnykh mestorozhdeniy*, 1986, V. 28, No. 3, pp. 47–60. (In Russ.)
 39. Polovnikova L. M., Kuznetsov V. V., Seravina T. V. Otchet o rezul'tatakh rabot po ob'yektu "Spetsializirovannyye geologo-geokhimicheskiye raboty na zoloto-serebrosoderzhashcheye polimetallicheskoye orudeneniye v predelakh Novokuznetskoy ploshchadi v Zmeinogorskom rudnom rayone (Altayskiy kray)"

- (Dogovor No.109/2015-YUL/2 ot 10.07.2015 g.) [Report on the results of work on the project "Specialized geological and geochemical work on gold-silver-bearing polymetallic mineralization within the Novokuznetsk area in the Zmeinogorsk ore region (Altai Territory)" (Agreement No. 109/2015-ЮЛ/2 dated 10.07.2015)], Moscow, 2017, 228 p. (In Russ.)
40. Popov V. V. Vulkanizm, tektonika i polimetallicheskiye orudneniye Leninogorskogo rudnogo rayona [Volcanism, tectonics and polymetallic mineralization of the Leninogorsk ore region], Almaty, Nauka publ., 1968, 173 p. (In Russ.)
 41. Pyatkova A. P., Mizernaya M. A., Miroshnikova A. P., Chernenko Z. I. Osobennosti formirovaniya VMS mestorozhdeniy v Rudnom Altaye na primere mestorozhdeniy Artem'yevskoye i Maleyevskoye [Features of the formation of VMS deposits in Rudny Altai on the example of the Artemyevskoye and Maleyevskoye deposits], Korrelyatsiya Altaid i Uralid, Novosibirsk, SO RAN publ., 2018, pp. 120–121. (In Russ.)
 42. Ruchkin G. V., Konkin V. D., Kuznetsov V. V., Pugacheva I. P. Parametricheskiye geologo-poiskovyye modeli kolchedanno-polimetallicheskiykh mestorozhdeniy [Parametric geological exploration models of pyrite-polymetallic deposits], Moscow, TSNIIGRI publ., 1992, 150 p. (In Russ.)
 43. Saydukasov M. S. Geologicheskoye stroeniye tsentral'noy chasti Zyryanovskogo rudnogo rayona i yego prognoznaya otsenka na kolchedanno-polimetallicheskiye orudneniye [Geological structure of the central part of the Zyryanovsky ore region and its predictive assessment of pyrite-polymetallic mineralization], Astana, 2002, 220 p. (In Russ.)
 44. Seravina T. V. Nekotoryye osobennosti formirovaniya kolchedanno-polimetallicheskiykh mestorozhdeniy tipa VMS Bol'shogo Altaya [Some features of the formation of pyrite-polymetallic deposits of the VMS type of the Greater Altai], Otechestvennaya geologiya, 2025, No. 5, pp. 16–45. (In Russ.)
 45. Seravina T. V., Kuznetsov V. V., Kryazhev S. G. Informatsionnyy geologicheskyy otchet o rezul'tatakh i ob'yemakh rabot, vpolnennykh za 2025 g. po ob'yektu "Izucheniye veshchestvennogo sostava rudovmeshchayushchikh porod, okolorudnykh metasomatitov, medno-svintsovo-tsinkovoy (s poputnym zolotom i serebrom) mineralizatsii Zapadno-Zakharovskoy ploschadi (Altayskiy kray)" (Dogovor No. VV-2/24 ot 14.06.2024 g.) [Information geological report on the results and volumes of work performed in 2025 on the project "Study of the material composition of ore-bearing rocks, wallrock metasomatites, copper-lead-zinc (with associated gold and silver) mineralization of the West Zakharovskaya area (Altai Territory)" (Agreement No. BB-2/24 dated June 14, 2024)], Moscow, 2025, 119 p. (In Russ.)
 46. Seravina T. V., Kuznetsov V. V., Kuznetsova S. V., Filatova L. K., Ivanenkova Ye. V. Kolchedanno-polimetallicheskiye orudneniye Rudnogo Altaya tipa VMS na primere Zaitsevskogo rudnogo polya (Zmeinogorskiy rudnyy rayon) [Pyrite-polymetallic mineralization of Rudny Altai of the VMS type on the example of the Zaitsevsky ore field (Zmeinogorsk ore region)], Otechestvennaya geologiya, 2025, No. 2, pp. 3–21. (In Russ.)
 47. Seravina T. V., Kuznetsova S. V., Filatova L. K. Osobennosti veshchestvennogo sostava vmeshchayushchikh porod i rud Lazurskogo rudnogo polya (Zmeinogorskiy rudnyy rayon, Rudnoaltayskaya mineragenicheskaya zona) [Features of the material composition of host rocks and ores of the Lazursky ore field (Zmeinogorsk ore region, Rudnoaltai mineragenic zone)], Otechestvennaya geologiya, 2021, No. 3–4, pp. 36–47. (In Russ.)
 48. Seravina T. V., Kuznetsova S. V., Filatova L. K., Donets A. I., Konkin V. D. Osobennosti lokalizatsii kolchedanno-polimetallicheskiykh rud Tushkanikhinskogo mestorozhdeniya (Rudnyy Altai) [Features of the localization of pyrite-polymetallic ores of the Tushkanikhinsky deposit (Rudny Altai)], Rudy i metally, 2022, No. 4, pp. 102–118. (In Russ.)
 49. Khisamutdinov M. G. Metallogeniya i polimetallicheskiye mestorozhdeniya Rudnogo Altaya [Metallogeny and polymetallic deposits of Rudny Altai], Leningrad, 1978, 195 p. (In Russ.)
 50. Chekalin V. M. Geologo-geneticheskaya model' Korbalikhinskogo mestorozhdeniya polimetallicheskiykh i kolchedannykh rud na Rudnom Altaye [Geological and genetic model of the Korbalikhinsky deposit of polymetallic and pyrite ores in Rudny Altai], Geologiya i geofizika, 1985, No. 8, pp. 78–91. (In Russ.)
 51. Chekalin V. M. Osnovnyye zakonomernosti razmeshcheniya i printsipial'naya model' formirovaniya kolchedanno-polimetallicheskiykh mestorozhdeniy severo-zapadnoy chasti Ridder-Sokol'nogo mestorozhdeniya [Basic patterns of placement and a fundamental model of the formation of pyrite-polymetallic deposits in the northwestern part of the Ridder-Sokolnoye deposit], Geologiya i geofizika, 1991, No. 10, pp. 75–89. (In Russ.)
 52. Chekalin V. M. Rubtsovskoye mestorozhdeniye polimetallicheskiykh rud na severo-zapade Rudnogo Altaya: usloviya obrazovaniya [Rubtsovskoye deposit of polymetallic ores in the northwest of Rudny Altai: conditions of formation], Almaty, 2012, pp. 253–266. (In Russ.)
 53. Chekvaidze V. B., Isakovich I. Z. Usloviya formirovaniya poslemagmaticheskoy mineralizatsii Tishinskogo mestorozhdeniya [Conditions of formation of post-magmatic mineralization of the Tishinsky deposit], Sov. Geologiya, 1971, No. 6, pp. 106–123. (In Russ.)

54. *Cheprasov B. A., Pokrovskaya I. V., Kovrigo O. A.* O poligennom kharaktere orudeneniya Ridder-Sokol'nogo mestorozhdeniya [On the polygenic nature of mineralization of the Ridder-Sokolnoye deposit], *Geologiya rudnykh mestorozhdeniy*, 1972, No. 6, pp. 30–45. (In Russ.)
55. *Chernyshev I. V., Vikent'yev I. V., Chugayev A. V.* Istochniki metallov kolchedannykh mestorozhdeniy Rudnogo Altaya po dannym vysokotochnogo MC-ICP-MS izucheniya izotopnogo sostava svintsa [Sources of metals of pyrite deposits of Rudny Altai according to high-precision MC-ICP-MS study of the isotopic composition of lead], *Geokhimiya*, 2023, V. 68, No. 6, pp. 545–569. (In Russ.)
56. *Shatobin A. A.* O vzaimootnosheniyakh metamorficheskikh protsessov i orudeneniya na Grekhovskom rudnom pole (Rudnyy Altay) [On the relationships between metamorphic processes and mineralization in the Grekhovskoye ore field (Rudny Altai)], *Geologiya i geofizika*, 1977, No. 7, pp. 138–144. (In Russ.)
57. *Shcherba G. N., Bespaev Kh. A., Dyachkov B. A.* Bol'shoy Altay (geologiya i metallogeniya). Kn. 2. Metallogeniya [Great Altai (geology and metallogeny). Book 2. Metallogeny], Almaty, RIO VAK RK publ., 2000, 400 p. (In Russ.)
58. *Shcherba G. N., Dyachkov B. A., Nakhtigal G. P.* Metallogeniya Rudnogo Altaya i Kalby [Metallogeny of Rudny Altai and Kalba], Alma-Ata, Nauka publ., 1984, 240 p. (In Russ.)
59. *Yudovskaya M. A.* Mineralogo-geokhimicheskiye osobennosti i usloviya formirovaniya rud Maleevskogo mestorozhdeniya na Rudnom Altaye [Mineralogical and geochemical features and conditions of formation of ores of the Maleevskoye deposit in Rudny Altai], Moscow, MGU publ., 1995, 31 p. (In Russ.)
60. *Yudovskaya M. A., Grinenko L. N., Yeregin N. I.* Genezis Maleevskogo kolchedanno-polimetallicheskoego mestorozhdeniya (Rudnyy Altay, Kazakhstan) [Genesis of the Maleevskoye pyrite-polymetallic deposit (Rudny Altai, Kazakhstan)], *Geologiya rudnykh mestorozhdeniy*, 1997, V. 39, No. 2, pp. 163–182. (In Russ.)
61. *Yakovlev G. F., Avdonin V. V.* Zakonomernosti razmeshcheniya kolchedanno-polimetallicheskich mestorozhdeniy na Rudnom Altaye [Patterns of distribution of pyrite-polymetallic deposits in Rudny Altai], *Izv. VUZov. Geol. i razvedka*, 1986, No. 11, pp. 27–39. (In Russ.)
62. *Yanvarev G. S.* Osobennosti geologicheskogo stroeniya i mineralizatsii kolchedanno-polimetallicheskoego mestorozhdeniya Chekmar' na Rudnom Altaye [Features of the geological structure and mineralization of the Chekmar pyrite-polymetallic deposit in Rudny Altai], *Geologiya rudnykh mestorozhdeniy*, Moscow, 1979, V. XXI, pp. 88–93. (In Russ.)
63. *Bian C. J., Xu J. H., Chen D. P., Zhang H., Cheng X. H.* A fluid inclusion study of vein-type copper mineralization in the east Wulasigou Pb–Zn–Cu deposit, Altay, northwestern China, *Acta Geol. Sin. (ENGL)*, 2016, № 90 (5), pp. 1754–1767.
64. *Chai F., Jingwen M., Lianhui D., Yang F., Liu F., Geng X., Zhang Z.* Geochronology of metarhyolites from the Kangbutiebao Formation in the Kelang basin, Altay Mountains, Xinjiang: Implications for the tectonic evolution and metallogeny, *Gondwana Research*, 2009, № 16, pp. 189–200.
65. *Franklin J. M., Gibson H. L., Jonasson I. R., Galley A. G.* Volcanogenic massive sulfide deposits, *Economic Geology 100th anniversary volume, 1905–2005*, 2005, pp. 523–560.
66. *Gao L.-L., Chen C., Wang K.-Y., Zhanga X.-B., Li S.-D.* Tectonic setting and geochronology of the Sarsuk Au polymetallic deposit in Xinjiang, NW China: Constraints from pyrite Re–Os, zircon U–Pb dating and Hf isotopes, *Ore Geol. Rev.*, 2020, 124.
67. *Geng X. X., Yang F. Q., Yang J. M., Guo Z. L., Guo X. J., Huang C. K., Liu F., Chai F. M., Zhang Z. X.* Stable isotope characteristics of Tiemurte Pb–Zn deposit in Altay, Xinjiang, *Mineral Deposits*, 2010, 29, pp. 1088–1100.
68. *Gibson H. L., Galley A. G.* Volcanogenic massive sulfide deposits of the Archean, Noranda district, Québec, *Mineral deposits of Canada – A synthesis of major deposit-types, district metallogeny, the evolution of geological provinces, and exploration methods: Geological Association of Canada, Mineral Deposits Division, 2007, Special Publication 5*, pp. 533–552.
69. *Hannington M. D., de Ronde C. E. J., Petersen S.* Seafloor tectonics and submarine hydrothermal systems, *Economic Geology 100th anniversary volume 1905–2005: Littleton, Colo., Society of Economic Geologists*, 2005, pp. 111–141.
70. *Li D.-F., Chen H.-Y., Hollings P., Li Z., Sun X.-M., Zheng Y., Xia X.-P., Xiao B., Wang C.-M., Fang J.* Trace element geochemistry of magnetite: Implications for ore genesis of the Talate skarn Pb–Zn (–Fe) deposit, Altay, NW China, *Ore Geol. Rev.*, 2018, 100, pp. 471–482.
71. *Li Q., Yang F., Zhang Z., Geng X., Liu F., Chai F.* Geology and geochemistry of the submarine volcanism-related Qiaxia Fe–Cu deposit in the southern Altay, Xinjiang, Central Asian Orogenic Belt, *Ore Geol. Rev.*, 2021, 128.
72. *Liu X., Liu W., Liu L.* The generation of a stratiform skarn and volcanic exhalative Pb–Zn deposit (Sawusi) in the southern Chinese Altay Mountains: The constraints from petrography, mineral assemblage and chemistry. *Gondwana Research*, 2012, № 22, pp. 597–614.
73. *Niu L., Hong T., Xu X. W., Li H., Ke Q., Wang X. H., Ma Y. C.* A revised stratigraphic and tectonic framework for the Ashele volcanogenic massive sulfide de-

- posit in the southern Chinese Altay: Evidence from stratigraphic relationships and zircon geochronology, *Ore Geol. Rev.*, 2020, 127, 103814.
74. *Piercey S. J.* A semipermeable interface model for the genesis of subseafloor replacement type volcanogenic massive sulfide (VMS) deposits, *Economic Geology*, 2015, V. 110, pp. 1655–1660.
75. *Shanks W. C., Pat III, Thurston R.* Volcanogenic massive sulfide occurrence model, U.S. Geological Survey Scientific Investigations Report, 2010, 5070, 345 p.
76. *Sun C., Yang X. Y., Zhang H. S., Ji W. H., Chen B., Dong Z. C., Faisal M., Xi D. H.* Tracing the formation and modification of the Keketale VMS-type Pb-Zn deposit, Altai Mountains: insights from ore deposit geology, geochronology, and magnetite geochemistry, *Ore Geol. Rev.*, 2022, 144.
77. *Sun C., Zhang H., Yang X., Ji W., Chen B., Li Y., Dong Z. C., Faisal M.* A tale of elemental accumulation and recycling in the metamorphosed Keketale VMS-type Pb-Zn deposit, Altai Mountains, *Geoscience Frontiers*, 2023, 14, Is. 1, pp. 101481.
78. *Sun C., Zhang H., Yang X., Ji W. H., Chen B., Li Y., Dong Z. C., Faisal M., He Z.* The role of long-lived arc volcanism in the formation of the VMS deposits: A case study of the volcanic-sedimentary sequence of Kangbutiebao formation associated with VMS deposits, Altai Mountains, *Gondwana Research*, 2023, № 118, pp. 194–217.
79. *Wan B., Zhang L. C., Xiang P.* The Ashele VMS-type Cu-Zn Deposit in Xinjiang, NW China Formed in a Rifted Arc Setting, *Resource Geology*, 2010, № 60 (2), pp. 150–164.
80. *Wan B., Zhang L. C., Xiao W. J.* Geological and geochemical characteristics and ore genesis of the Keketale VMS Pb-Zn deposit, Southern Altai Metallogenic Belt, NW China, *Ore Geol. Rev.*, 2010, 37 (2), pp. 114–126.
81. *Wang D. H., Chen Y. C., Mao J. W.* The Ashele deposit: A recently discovered Volcanogenic Massive Sulfide Cu-Zn deposit in Xinjiang, China, *Resource Geology*, 1998, 48 (1), pp. 31–42.
82. *Wang J. B., Qin K. Z., Wu Z. L., Hu J. H., Deng J. N.* Volcanic-exhalative-sedimentary lead zinc deposit in the southern margin of the Altai, Xinjiang, Beijing, *Geology Publishing House*, 1998, pp. 1–210.
83. *Wu Y., Yang F., Liu F., Geng X., Li Q., Zheng J.* Petrogenesis and tectonic settings of volcanic rocks of the Ashele Cu-Zn deposit in southern Altay, Xinjiang, Northwest China: Insights from zircon U-Pb geochronology, geochemistry and Sr-Nd isotopes, *Journal of Asian Earth Sciences*, 2015, № 112, pp. 60–73.
84. *Yang C. D., Geng X., Yang F., Qiang Li.* Metallogeny of the Sarsuk polymetallic Au deposit in the Ashele Basin, Altay Orogenic Belt, Xinjiang, NW China: Constraints from mineralogy, fluid inclusions, and He-Ar isotopes, *Ore Geol. Rev.*, 2018, № 100, pp. 77–98.
85. *Yang C. D., Zhang B., Yang F. Q., Li Q., Wang Y. Q.* Zircon U-Pb age, fluid inclusion, and H-C-O-He-Ar-S isotopic compositions as an index to the VMS type mineralization: a case study from the Wulasigou polymetallic deposit, Altay Orogenic Belt, Northwest China, *J. Geochem. Explor.*, 2021, 222.
86. *Yang F. Q., Geng X. X., Wang R., Zhang Z. X., Guo X. J.* A synthesis of mineralization styles and geodynamic settings of the Paleozoic and Mesozoic metallic ore deposits in the Altay Mountains, NW China, *J. Asian Earth Sci.*, 2018, № 159, pp. 233–258.
87. *Yang F. Q., Mao J. W., Liu F., Dong Y. G., Chai F. M., Geng X. X.* Geological characteristics and metallogenesis of the Keyinbulake copper-zinc deposit in Altay, Xinjiang, *Acta Petrol. Sin.*, 2010, № 26 (02), pp. 361–376.
88. *Yang F., Li Q., Yang C. D., Zhang Z.* A combined fluid inclusion and S-H-O-He-Ar isotope study of the Devonian Ashele VMS-type copper-zinc deposit in the Altay orogenic belt, northwest China, *Journal of Asian Earth Sciences*, 2018, № 161, pp. 139–163.
89. *Yang F., Liu F., Li Q., Geng X.* In situ LA-MC-ICP-MS U-Pb geochronology of igneous rocks in the Ashele Basin, Altay orogenic belt, northwest China: Constraints on the timing of polymetallic copper mineralization, *Journal of Asian Earth Sciences*, 2014, № 79, pp. 477–496.
90. *Yang J. J., Yang X. K., Yang C. D., Li Q., Yang F. Q.* Genesis of the Talate Pb-Zn (-Fe) deposit in the Altay, Xinjiang, NW China: evidence from fluid inclusions and stable isotopes, *Ore Geol. Rev.*, 2022, pp. 144.
91. *Yang Y., Zhang H., Yang X., Sun C., Ren G., Li Y., Chen B., Jin M., Zhao X., Zhou N.* Evolution of the hydrothermal ore-forming system of Ashele VMS-type Cu-Zn deposit in Xinjiang, NW China: Insights from mineralogy and geochemistry of sulfides, *Ore Geol. Rev.*, 2024, pp. 167.
92. *Yu P. P., Zheng Y.* Pb-Zn-Cu accumulation from seafloor sedimentation to metamorphism: constraints from ore textures coupled with elemental and isotopic geochemistry of the Tiemurt in Chinese Altay Orogen, NW China, *Gondwana Res.*, 2019, № 72, pp. 65–82.
93. *Yuan L., Liu F.* Sulfide Re-Os age and Rb-Sr age of Talate Pb-Zn-Fe polymetallic deposit in Southern Altay and their geological significance, *Mineral Deposits*, 2017, № 36, pp. 1333–1351.
94. *Zhang L., Zheng Y., Chen Y.-J.* Ore geology and fluid inclusion geochemistry of the Tiemurt Pb-Zn-Cu deposit, Altay, Xinjiang, China: A case study of orogenic-type Pb-Zn systems, *Journal of Asian Earth Sciences*, 2012, № 49, pp. 69–79.

95. *Zhang W., Zhang X., Liu G., Guo X.* Magmatic-sea-water interaction in the Keyinbulake Zn-Cu deposit (NW China): Insight from sulfide S isotope and trace elements, *Ore Geol. Rev.*, 2026, 188.
96. *Zheng Y., Wang Y., Chen H., Lin Z., Hou W., Li D.* Micro-textural and fluid inclusion data constraints on metallic remobilization of the Ashele VMS Cu-Zn deposit, Altay, NW China, *Journal of Geochemical Exploration*, 2016, 171, pp. 113–123.
97. *Zheng Y., Zhang L., Li D.-F., Kapsiotis A., Chen Y.-J.* Genesis of the Dadonggou Pb–Zn deposit in Kelan basin, Altay, NWChina: Constraints from zircon U–Pb and biotite $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ geochronological data, *Ore Geol. Rev.*, 2015, 64.

Статья поступила в редакцию 16.04.26; одобрена после рецензирования 22.05.26 ; принята к публикации 22.05.26.
The article was submitted 16.04.26; approved after reviewing 22.05.26 ; accepted for publication 22.05.26.

По всем вопросам, связанными со статьями, следует обращаться в редакцию
по тел. +7 (495)315-43-65 доб. 227
E-mail: ogeo@tsnigri.ru

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