

Некоторые особенности формирования колчеданно-полиметаллических месторождений типа VMS Большого Алтая

Аннотация: Большой Алтай является одним из важных участков для понимания геологии и металлогении Центральной Азии. Это территория, обладающая крупной минерально-сырьевой базой металлургии России, Казахстана, Китая и Монголии. Несмотря на длительную интенсивную разработку золоторудных, полиметаллических и редкометалльных месторождений, потенциальные возможности этого региона далеко не исчерпаны. В статье проведено комплексное исследование колчеданно-полиметаллических месторождений типа VMS, выявленных в этом трансграничном регионе. Установлены геолого-структурные, петрохимические и металлогенические закономерности их размещения. Показана приуроченность оруденения к двум девонским рудоносным формациям: нижней (калиево-натриевая) и верхней (натриево-калиевая). Петрохимический анализ, выполненный на основе созданной базы химических анализов (> 500 проб) вулканогенных пород рудоносных формаций, подтвердил формирование пород в рифтогенной обстановке. Максимальная продуктивность характерна для Прииртышского и Лениногорского рудных районов, что связано с мощностью рудоносных толщ и интенсивностью тектоно-магматических процессов. Главный резерв открытия новых месторождений заложен в не выходящих на дневную поверхность рудных объектах.

Ключевые слова: месторождения типа VMS, Большой Алтай, медь, свинец, цинк, рудоносные формации, петрохимические особенности.

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

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

Some features of formation of 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

Annotation. The Greater Altai is one of the important areas for understanding the geology and metallogeny of Central Asia, it is an area with a large mineral resource base of metallurgy in Russia, Kazakhstan, China and Mongolia.

Despite the long-term intensive development of gold, polymetallic and rare metal deposits, the potential of this region is far from exhausted. The article provides a comprehensive study of pyrite-polymetallic deposits of the VMS type identified in this transboundary region. Geological, structural, petrochemical, and metallogenic patterns of their placement have been established. The occurrence of mineralization in two Devonian ore-bearing formations is shown: the lower (potassium-sodium) and the upper (sodium-potassium). The petrochemical analysis performed on the basis of the created database of chemical analyses (> 500 samples) of volcanogenic rocks of ore-bearing formations confirmed the formation of rocks in a riftogenic environment. The maximum productivity is characteristic of the Irtyshskij and Leninogorskij ore regions, which is associated with the thickness of the ore-bearing strata and the intensity of tectonic and magmatic processes. The main reserve for the discovery of new deposits is laid in ore objects that do not go out to the daytime surface.

Key words: VMS type deposits, Greater Altai, copper, lead, zinc, ore-bearing formations, petrochemical features.

Введение. Колчеданные месторождения в вулканогенных ассоциациях (VMS), являющиеся важным источником меди, цинка, свинца, золота и серебра, характеризуются приуроченностью сульфидного оруденения к вулканогенным породам. Объекты данного типа широко распространены во всём мире, известно более 1100 месторождений. Месторождения типа VMS играют важную роль в минерально-сырьевой базе свинца и цинка, уступая месторождениям SEDEX и MVT. Однако их комплексный состав и географическая распространённость делают их стратегическими объектами, особенно в регионах с развитой горнодобывающей инфраструктурой. Наиболее крупные месторождения данного типа расположены в Канаде, Испании, Австралии и Португалии. Выявлены как небольшие рудопроявления, так и супергигантские залежи (рис. 1).

Структуры Большого Алтая являются важной частью Центрально-Азиатского складчатого пояса (ЦАСП) и простираются более чем на 2500 км через территорию Российской Федерации, Республики Казахстан, северо-запада КНР (Синьцзян) и за-

падной Монголии. В пределах Большого Алтая находятся крупные месторождения цветных, благородных и редких металлов (Au, Cu-Mo, Fe, Pb-Zn, Ni-Cu (PGE), Li-Be-Nb-Ta и др.) [1, 2, 4, 9, 10, 12, 13, 16, 17, 20, 33, 35, 36, 37, 38, 45, 49, 50, 53, 54, 59, 60, 61, 62]. В настоящее время выявлены 16 крупных колчеданно-полиметаллических месторождений, которые играют важную роль в экономике государств. Общие запасы полиметаллов Большого Алтая, установленные на месторождениях типа VMS, составляют 60 млн т (в том числе (в млн т): свинца – 12,7, цинка – 34, меди – 13,3, а также золота 800 т и серебра 25 тыс. т). Наиболее крупными колчеданно-полиметаллическими месторождениями типа VMS (более 1 млн т меди, свинца и цинка) Большого Алтая являются: Риддер-Сокольное, Новоленингорское, Тишинское, Чекмарь, Орловское, Иртышское, Белоусовское, Николаевское, Малеевское, Зырянское, Греховское (Республика Казахстан), Корбалихинское, Золотушинское (Российская Федерация), Кекетале, Ашеле (КНР) и Дулаан кхар уул (Монголия) (см. рис. 1) [4, 6, 9, 11, 16, 17, 20, 25, 32, 35, 39, 42–44, 45, 51, 55, 57, 58, 64, 66, 67, 68, 69, 70].

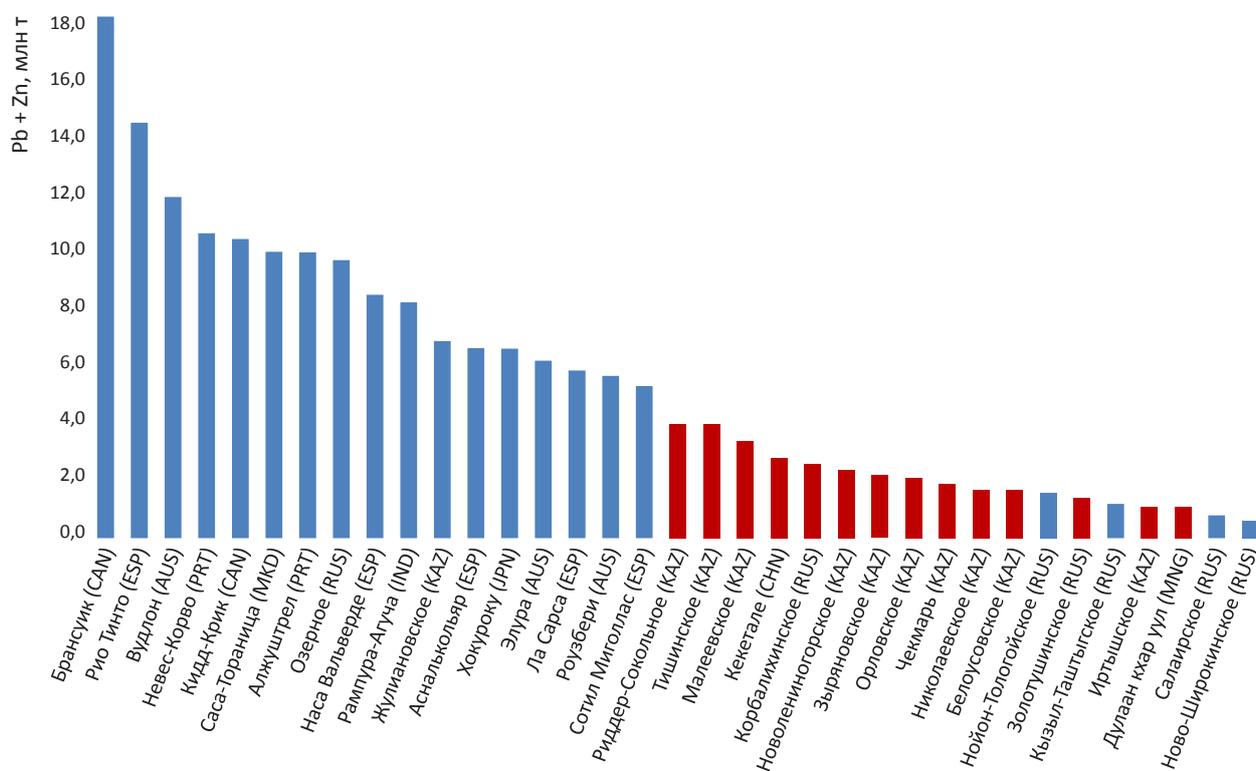


Рис. 1. Крупнейшие месторождения типа VMS мира (по запасам свинца и цинка). С использованием материалов [8, 11, 20, 40, 41, 48, 51, 55, 56, 57, 69]. Красным цветом выделены VMS месторождения, расположенные в пределах Большого Алтая

История исследования. Исследование колчеданно-полиметаллических месторождений в пределах Большого Алтая имеет многовековую историю, тесно связанную с промышленным развитием, геологическими открытиями и международным сотрудничеством.

Российский Алтай. Промышленное освоение региона началось в XVIII в. благодаря деятельности династии Демидовых, которые начали освоение Змеиногорского месторождения (1720-е гг.). Первые систематические геологические исследования Алтая начались в XIX в., в частности, благодаря экспедициям таких учёных, как Пётр Чихачёв, который в 1842 г. по поручению русского правительства изучил Восточный Алтай и опубликовал фундаментальный труд «Путешествие в Восточный Алтай». К концу XIX в. Алтай стал центром сереброплавильного производства, однако к началу XX в. многие рудники истощились. В советский период активные геологоразведочные работы выявили новые объекты, такие как Корбалихинское, Зареченское, Рубцовское, Степное, Таловское, Золотушинское, Юбилейное и другие месторождения, что привело к созданию горно-обогатительных комбинатов. Эти работы сопровождалось геологическим изучением рудных районов, полей и месторождений, научными и методическими разработками [20].

Казахстанский Алтай. Рудный Алтай, исторически входивший в Российскую империю, известен Колывано-Воскресенскими заводами (XVIII в.), обеспечивавшими до 90 % российской меди. В советский период здесь были созданы крупные горно-металлургические комбинаты (Лениногорский и Зыряновский), а также открыты уникальные месторождения, такие как Малеевское, Орловское, Тишинское, Новолениногорское и другие. После 1991 г. привлечение иностранных инвестиций позволило модернизировать добычу и переработку руд [6].

Китайский Алтай. До XX в. в пределах территории проводились ограниченные исследования из-за удалённости и сложного рельефа. Рудознатоцы фиксировали признаки медных и серебряных руд. Активные исследования в Синьцзяне начались в 1950-х гг. при поддержке СССР. В настоящее время крупнейшие месторождения, такие как Кекетале и Ашеле, разрабатываются компаниями с использованием современных методов добычи [51, 55, 58].

Монгольский Алтай. До середины XX в. системные исследования отсутствовали, кочевые народы использовали поверхностные медные руды для ремёсел. Совместные советско-монгольские экспедиции (1950–1980-е гг.) выявили месторождения Асгат и Дулаан кхар уул, но их освоение началось лишь в 2000-х гг. благодаря иностранным инвестициям [57].

В 1998 г. вышла монография «Большой Алтай (геология и металлогения)», где была предложена модель глубинного строения региона, основанная на данных тектонических реконструкций [33].

Интерес к комплексному изучению территории этого региона появился после завершения международного проекта «Атлас геологических карт Центральной Азии и сопредельных государств масштаба 1 : 2 500 000» (2000–2008 гг.).

С 2010 г. по настоящее время реализуется проект «Большой Алтай», в рамках которого ФГБУ «ЦНИГРИ» проводит геологическое изучение приграничных территорий с целью создания единых металлогенических схем и прогнозно-поисковых моделей рудных районов, узлов и месторождений [46]. Анализ материалов показал, что главной проблемой для понимания структуры, геологических особенностей и прогнозирования является отсутствие единой структурно-формационной и металлогенической схемы Большого Алтая. Поэтому в 2025 г. была составлена такая карта [17], позволяющая визуализировать позицию всех структурно-формационных зон исследуемого региона.

Типовые месторождения. Основные колчеданно-полиметаллические месторождения типа VMS, выявленные в пределах российской части Большого Алтая, подробно рассмотрены в ряде работ [19, 21, 26, 27, 28, 29]. В данной статье в качестве примера приводятся типовые месторождения, расположенные в казахстанской и китайской частях Большого Алтая.

1. *Тишинское колчеданно-полиметаллическое месторождение* находится в Лениногорском рудном районе (Восточно-Казахстанская область, Республика Казахстан), его запасы составляют 4271 тыс. т (меди, свинца и цинка). В отличие от Риддер-Сокольного месторождения, открытого ещё в 1776 г. горным офицером Филиппом Риддером, Тишинское месторождение было обнаружено значительно позже – в 1958 г. в ходе планомерных геологоразведочных работ советского периода. Промышленная разработка месторождения началась в 1965 г., когда оно было введено в

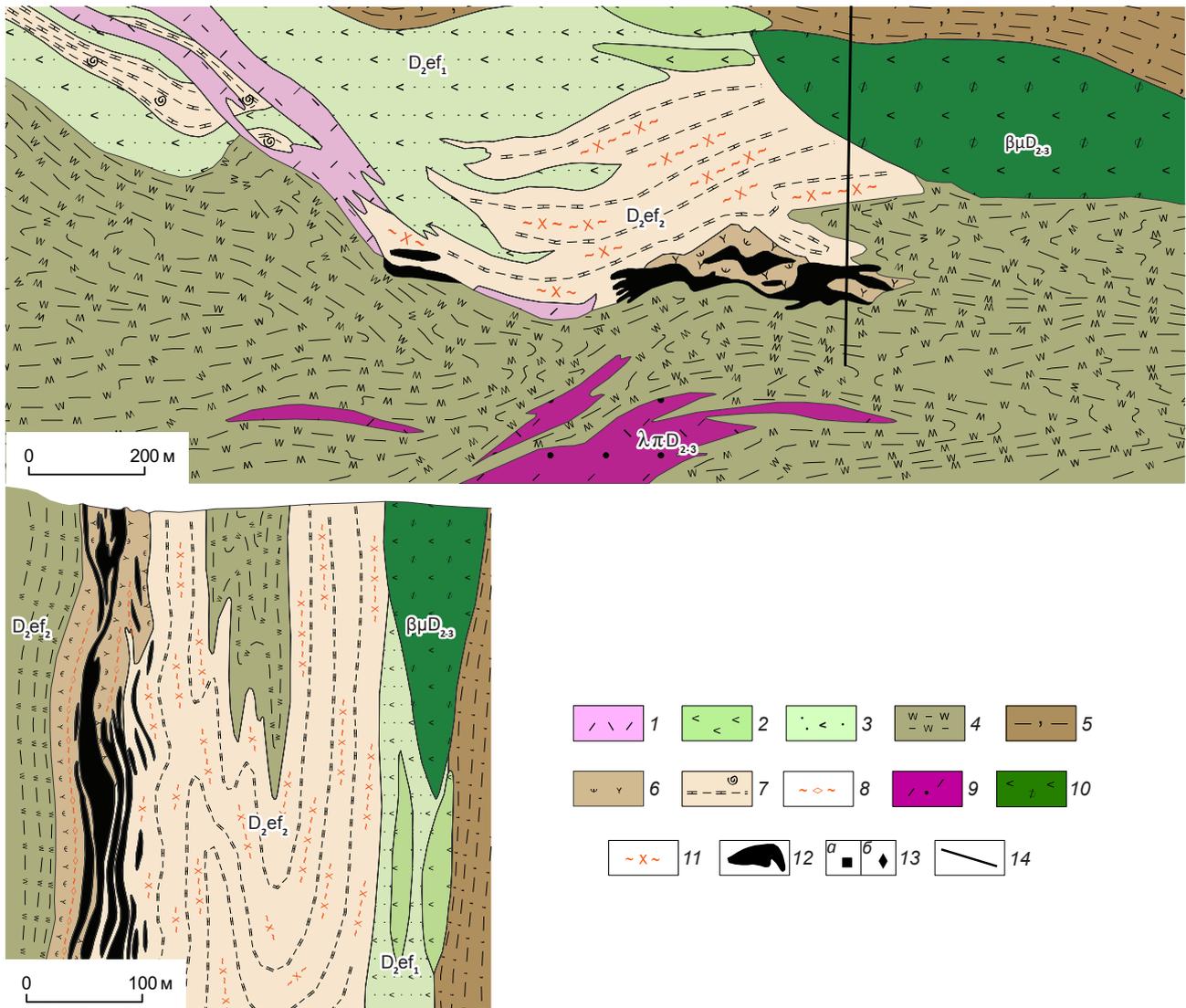


Рис. 2. Литологическая карта и разрез Тишинского месторождения, с использованием материалов [25]:

1–7 нижняя базальтсодержащая андезит-дацит-риолитовая известково-кремнисто-терригенная рудоносная формация ($D_1e-D_2gv_2$): 1 – лавы риолитового и 2 – андезибазальтового составов, 3 – вулканогенно-осадочные породы (без расчленения), 4 – алевролиты известково-углеродистые и 5 – кремнисто-глинистые, 6 – туффиты разного состава, 7 – алевропелиты известковые органогенные; 8 – сланцы карбонат (доломит)-кварц-серицитовые; 9 – риолиты крупновкрапленные; 10 – андезибазальты; 11 – сланцы кварц-серицит-хлоритовые; 12 – рудные тела; 13 – минерализация: а – пирит, б – галенит; 14 – линия разреза

эксплуатацию как часть Лениногорского полиметаллического комбината. Особенностью освоения этого месторождения стало применение комбинированного способа разработки: карьерная (до глубины 430 м; с 1963 по 1978 гг.) и подземная разработка (по настоящее время).

Месторождение характеризуется сложным геологическим строением, оно приурочено к отложе-

ниям средней части разреза рудоносной базальтсодержащей андезит-дацит-риолитовой известково-кремнисто-терригенной формации (туфогенно-осадочные тонкообломочные породы) (рис. 2). Современная структура месторождения представляет собой сложную систему тектонических линз и клиновидных блоков, в которых породы падают почти вертикально и смяты в изоклиналильные складки.

На месторождении выделяются две основные рудные залежи: основная и северо-западная, которые имеют линзовидную и лентовидную формы, осложнённые многочисленными раздувами и пережимами, расщеплениями, малоамплитудными складками, реже встречаются разобщённые штокверковые тела. Основные типы руд – полиметаллические, медно-цинково-колчеданные и серноколчеданные, реже – медноколчеданные, свинцово-цинковые и цинковые. Текстуры руд – прожилково-вкрапленные, реже массивные, полосчатые, плейчатые и катакlastические. Главные рудные минералы – пирит, халькопирит, галенит, сфалерит, реже пирротин и блёкляя руда [25].

2. *Малеевское колчеданно-полиметаллическое месторождение* расположено в Зырянском рудном районе (Восточно-Казахстанская область, Республика Казахстан), его запасы составляют 4293 тыс. т (меди, свинца и цинка). Масштабное изучение данного рудного района было начато в XVIII в., с открытия в 1791 г. геологом Г. Зыряновым первых рудников. Однако месторождение было открыто в рамках системных геологоразведочных работ под руководством Д. И. Горжевского и Г. Ф. Яковлева в 1950–1970-е гг. [6], А. К. Каюповым, которые выявили новые рудные узлы. Детальная разведка, проведённая в 1980-е гг., подтвердила промышленную ценность месторождения.

Месторождение приурочено к верхней части разреза базальтсодержащей андезит-дацит-риолитовой известково-кремнисто-терригенной формации. Геологический разрез месторождения представлен вулканогенно-осадочными породами, включающими туфы, туффиты, алевропелиты и известняки. Рудные тела локализованы в кремнистых алевролитах (рис. 3). Рудовмещающая пачка расположена на крыле антиклинали, моноклинально падает на северо-запад, осложнена флексуорообразными перегибами и разломами субмеридионального и широтного простирания. Рудные залежи ленто- и пластообразной формы в комбинации с секущими апофизами залегают субсогласно с вмещающими породами.

Основные типы руд – колчеданно-полиметаллический, медно-цинковый, медноколчеданный, барит-колчеданно-полиметаллический, барит-полиметаллический. Текстуры руд – массивные, слоистые, полосчато-слоистые, брекчиевидные, прожилково-вкрапленные. Главные рудные минералы – сфалерит, халькопирит, пирит, галенит, барит. Руды месторождения демонстрируют признаки

как первичного гидротермально-осадочного образования, так и последующего метаморфогенного преобразования, включая перекристаллизацию и образование метакристаллов [25].

3. *Медно-цинковое месторождение Ашеле (Ashele)* находится в рудном районе Ашеле (Синьцзян-Уйгурский автономный район, Китайская Народная Республика) и его суммарные запасы меди и цинка составляют 1516 тыс. т. Месторождение было открыто в 1980-х гг. китайскими геологами в ходе систематических поисковых работ в пределах Китайского Алтая. Промышленная эксплуатация началась в 1995 г. после завершения детальной разведки и оценки запасов. В настоящее время месторождение разрабатывается открытым способом с годовой производительностью около 3 млн т руды. Особенностью месторождения является его расположение в труднодоступном горном районе, что потребовало значительных инвестиций в инфраструктуру – строительство дорог, линий электропередачи и обогатительной фабрики. Эти сложности компенсируются высоким качеством руд и благоприятными горно-геологическими условиями для отработки.

Месторождение сложено породами формаций Ашеле (рудоносная, ранний–средний девон) и Цие (поздний девон) (рис. 4). Наиболее крупное рудное тело № 1 содержит более 98 % выявленных запасов меди и 97,5 % запасов цинка. Оно протягивается с севера на юг, имеет длину 900 м по простиранию и залегает на глубине 25–1500 м. Вмещающие вулканогенные породы и руды смяты в складки и имеют форму крюка (с базальтами в висячем боку и риолитами в лежащем боку). Рудное тело № 2 имеет двухслойную структуру: верхняя часть – пластообразное, согласное, массивное баритовое рудное тело; нижняя часть – прожилково-вкрапленные и штокверковые Cu-Pb-Zn-Ag рудные тела. Основные типы руд – колчеданные, медноколчеданные, медно-цинковые колчеданные, полиметаллические и полиметаллические баритовые. Текстуры руд – массивные, полосчатые, лентовидные, пятнистые, вкрапленные, штокверковые, жильные, прожилковые и брекчиевые. Главными рудными минералами являются халькопирит, сфалерит, галенит и пирит, а второстепенными – тетраэдрит, борнит, теннантит, антимонит, пирротин, самородное золото, электрум и тетрадимит [44, 51, 69].

4. *Полиметаллическое месторождение Кекетале (Keketale, Koktal или Koktag)* расположено в рудном районе Майзи (Maizi) (Синьцзян-Уйгурский

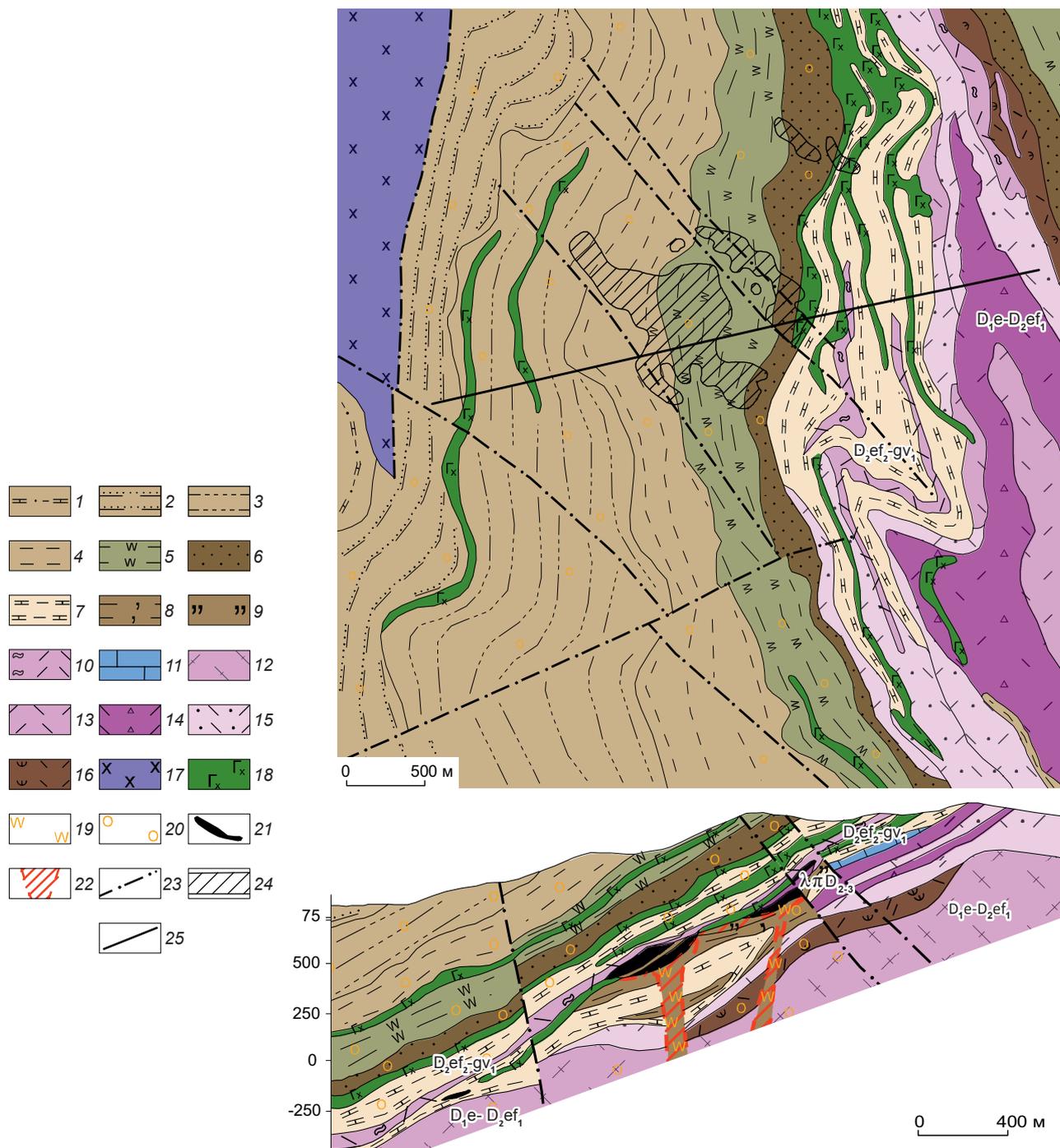


Рис. 3. Литологическая карта и разрез Малеевского месторождения, с использованием материалов [25]:

1–6 – надрудные отложения: 1 – алевролиты, песчаники, известняки, 2 – аргиллиты, песчаники, 3 – алевропесчаники, 4 – песчаники, алевропелиты, 5 – глинисто-углистые алевропелиты, 6 – песчаники; 7–11 – нижняя базальтсодержащая андезит-дацит-риолитовая известково-кремнисто-терригенная рудоносная формация ($D_1e-D_2gv_2$): 7 – известковистые алевролиты, 8 – кремнистые алевролиты, 9 – кремни, 10 – игнимбриты, 11 – карбонатные породы; 12–16 – подрудные отложения: 12 – риолиты, 13 – лавы риолитового состава, 14 – лавобрекчии риолитового состава, 15 – туфы риолитового состава среднеобломочные, 16 – туфы, туффиты риолитового состава; 17 – диориты; 18 – габбро-долериты; 19 – кварциты; 20 – ороговикованные породы; 21 – рудные тела; 22 – зоны подводящих каналов; 23 – разрывные нарушения; 24 – вертикальная проекция рудных зон; 25 – линия разреза

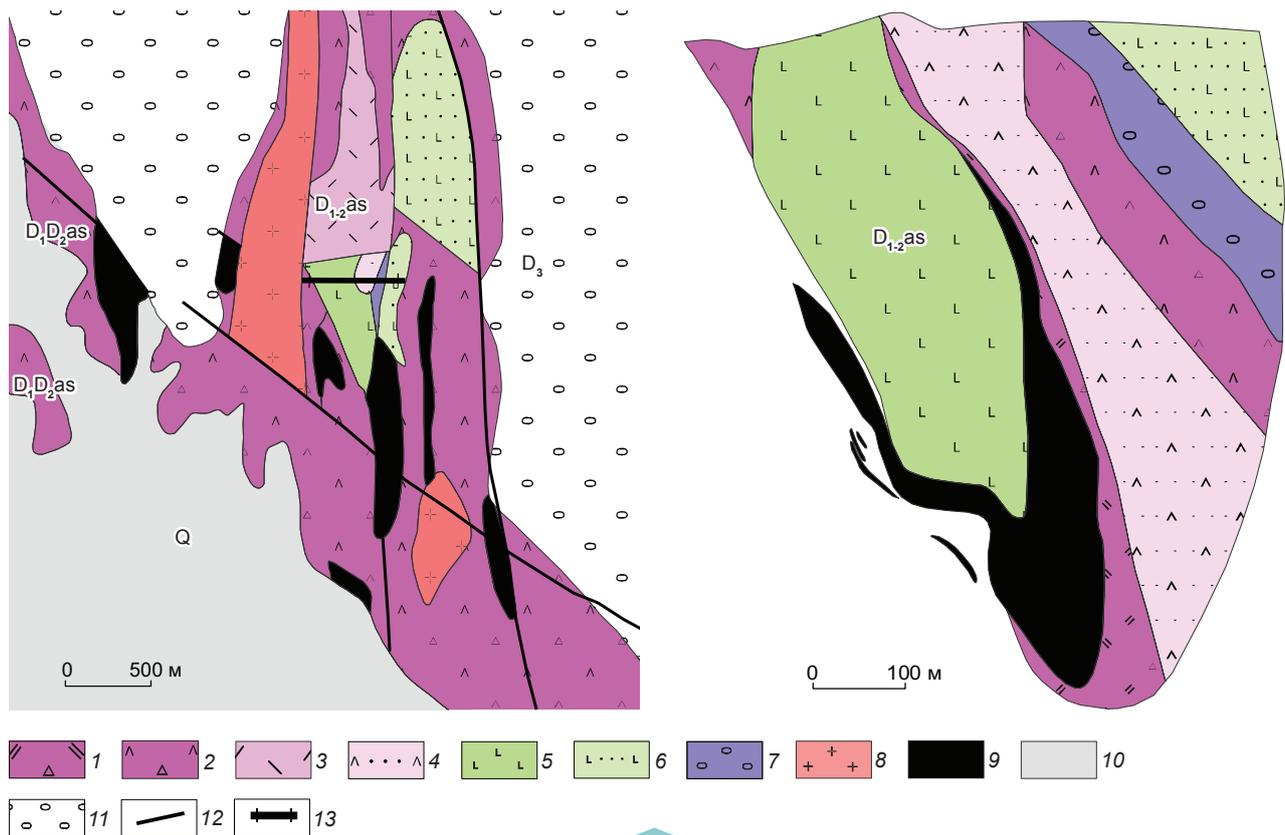


Рис. 4. Литологическая карта и разрез месторождения Ашеле, с использованием материалов [69]:

1–7 – рудоносная формация Ашеле ($D_{1-2}as$): 1 – лавобрекчии риолитового и 2 – дацитового составов, 3 – лавы риолитового состава, 4 – туфы дацитового состава, 5 – лавы базальтового состава, 6 – туфы базальтового состава, 7 – вулканические конгломераты; 8 – гранит-порфиры; 9 – рудные тела; 10 – четвертичные отложения; 11 – надрудные отложения (D_3); 12 – разрывные нарушения; 13 – линия разреза

автономный район, Китайская Народная Республика), его запасы (свинца и цинка) составляют 2830 тыс. т. Месторождение было открыто в ходе масштабных геологоразведочных работ, проводившихся в пределах Китайского Алтая во второй половине XX в. Это открытие стало частью более широкой программы по изучению минерально-сырьевой базы Синьцзян-Уйгурского автономного района. Первые систематические геологические исследования в районе современного месторождения Кекетале начались в 1950-х гг., когда китайские геологи приступили к изучению металлогенического потенциала Алтайских гор. В 1970-е гг. были проведены региональные геофизические исследования (магниторазведка и гравиразведка), которые выявили аномалии, указывающие на возможное наличие крупного рудного тела. В 1980-е гг. начаты детальные геологораз-

ведочные работы, включающие геологическую съёмку масштаба 1 : 50 000, геохимическое опробование и бурение первых скважин. Официальным годом открытия месторождения считается 1990 г., когда были получены первые промышленные пробы руды с высоким содержанием свинца, цинка и сопутствующих металлов. Последующие исследования в 1990-х гг. подтвердили промышленную ценность месторождения и позволили начать его освоение в начале 2000-х гг. До 2007 г. месторождение разрабатывалось несколькими небольшими частными горнодобывающими компаниями, которые добывали только высокосортные руды, оставляя низкосортные. В настоящее время месторождение находится в совместной собственности двух крупных компаний. Из-за холодного климата добыча ведётся только около восьми месяцев в году.

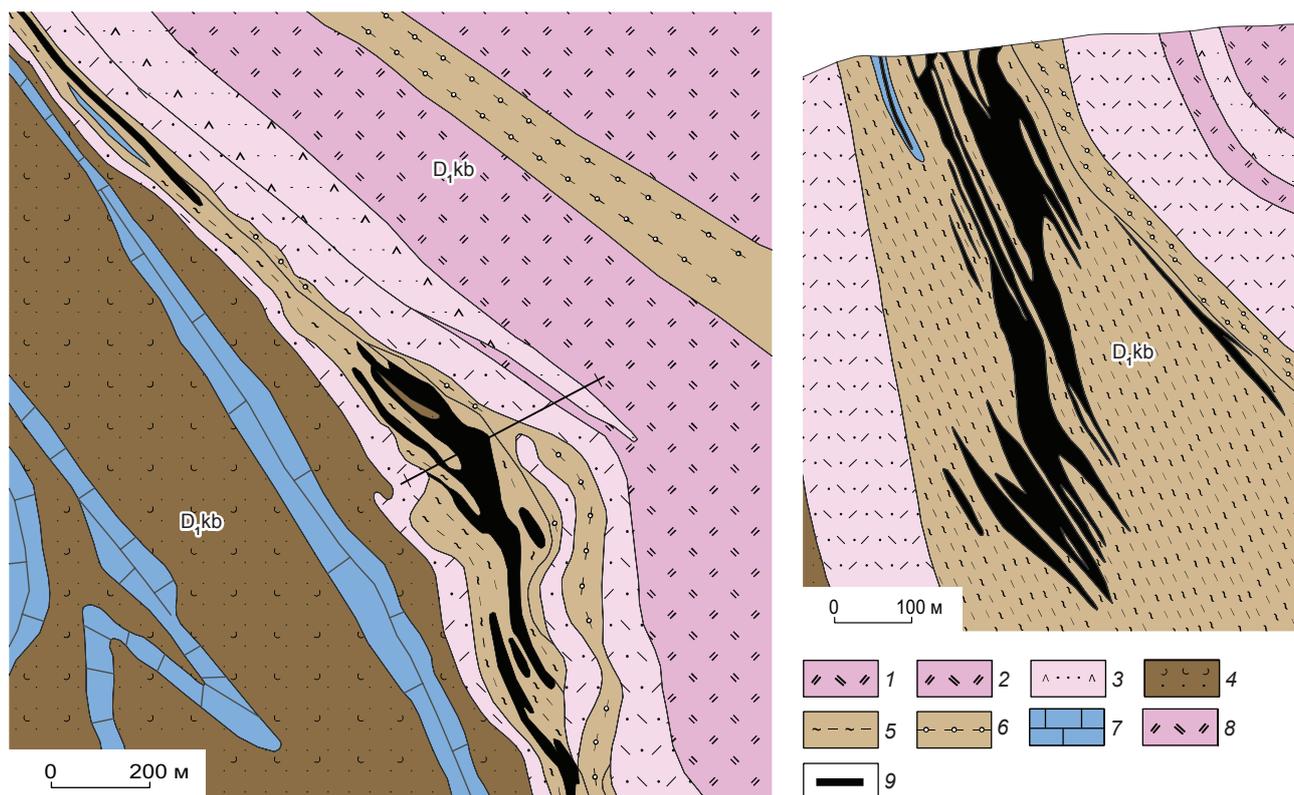


Рис. 5. Литологическая карта и разрез месторождения Кекетале, с использованием материалов [71]:

1–7 – рудоносная формация Кангбутибао (D_1kb): 1 – лавы риолитового и риодацитового состава, 2 – туфы риолитового состава мелко- и среднеобломочные, 3 – туфы дацитового состава мелко- и среднеобломочные, 4 – туфопесчаники, 5 – гранат-биотитовые сланцы по туфоалевролитам, 6 – биотит-кварцевые сланцы по туфоалевролитам, 7 – известняки; 8 – рудные тела; 9 – линия разреза

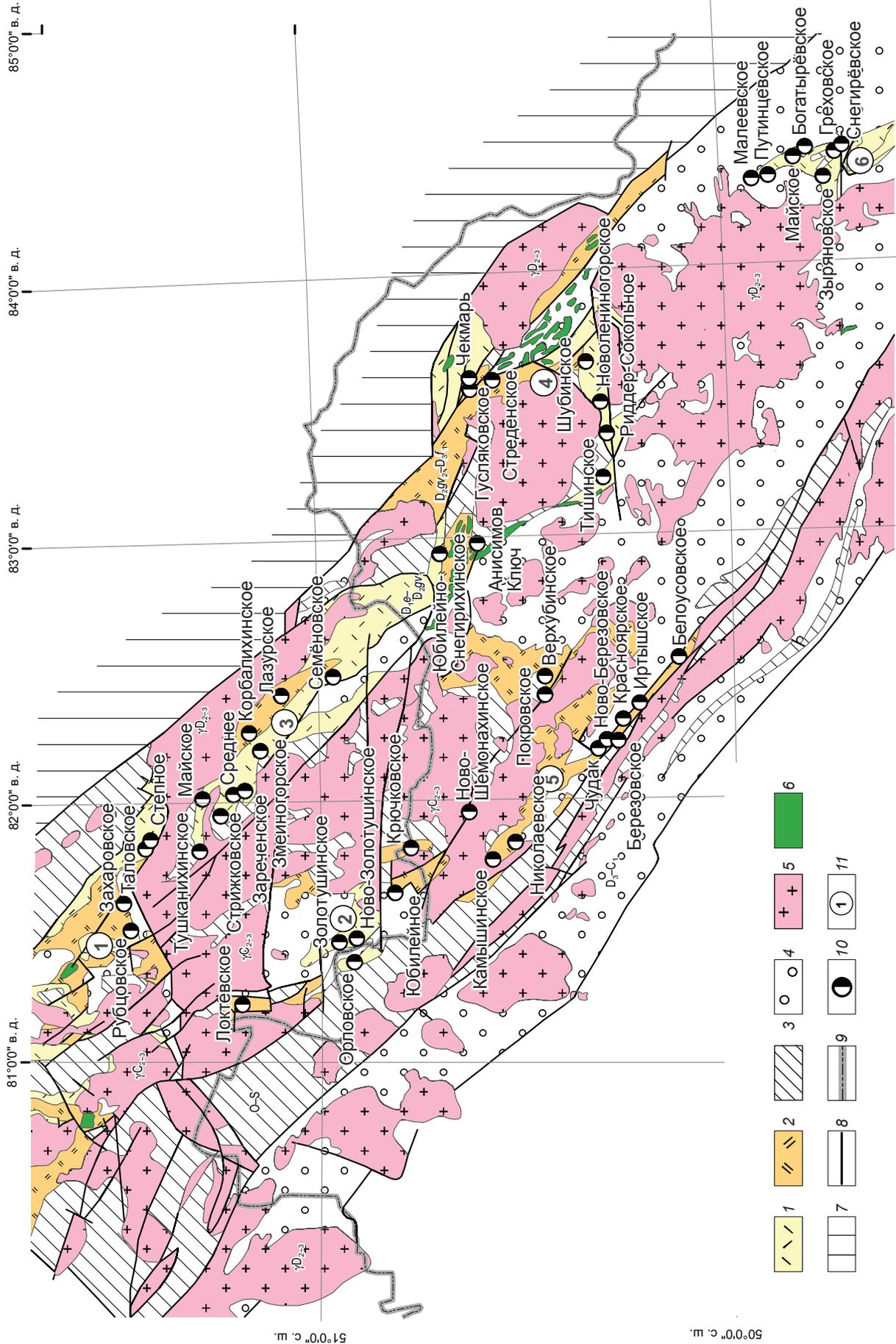
Месторождение приурочено к породам верхней части рудоносной формации Кангбутибао раннедевонского возраста (рис. 5). Рудовмещающие отложения представлены вулканогенно-осадочными породами: риолитовыми туфами, кварцитами, лавами кислого состава, алевролитами, песчаниками, мраморами и сланцами. Месторождение состоит из 12 рудных тел, среди которых основными являются рудные тела № 1, № 7 и № 9.

Рудные залежи согласны с напластованием вмещающих пород, характеризуются пластовой формой с раздувами и пережимами мощности. Основные типы руд – свинцово-цинковый, полиметаллический. Текстуры руд – массивные, вкрапленные, полосчатые, слоистые, жильные. Главные рудные минералы – сфалерит, галенит, пирит, с небольшим количеством пирротина и редким халькопиритом [55, 56, 58, 71].

Рудоносные формации. Основные месторождения типа VMS Большого Алтая расположены в пределах Рудноалтайской структурно-формационной зоны (СФЗ), которая имеет продолжение в пределах Китайского (Chinese Altai) и Монгольского (Mongol Altai) Алтая [17]. Все месторождения данного типа локализуются в вулканогенно-осадочных и вулканогенных породах рудоносных формаций девонского возраста, которые соответствуют двум циклам вулканической активности в регионе [3, 14, 15, 18, 19, 20, 31].

По отношению к центрам вулканической активности формирование пород этих формаций происходило в околожерловой, промежуточной и удалённой зонах, отличающихся друг от друга соотношением вулканогенного и осадочного материала. Формирование стратифицированных вулканитов сопровождалось образованием экстрозив-

Месторождения рудных и нерудных полезных ископаемых



ных и субвулканических тел. Последние являются подводными каналами и слагают корневые зоны вулканических построек [24].

Анализ распределения полиметаллического оруденения в продуктах вулканической деятельности свидетельствует о том, что основная масса месторождений и рудопроявлений сосредоточена в пачках частого переслаивания вулканогенно-осадочных отложений удаленной зоны, что отражено на рисунках 2–5. Литологический контроль оруденения определяется физико-механическими свойствами пород.

В пределах Рудноалтайской МЗ (территория Российской Федерации и Республики Казахстан) развиты нижняя (эмс-раннеживетская, ранний цикл вулканической активности) и верхняя (позднеживетская–раннефранская, поздний цикл вулканической активности) рудоносные геологические формации (рис. 6). Нижняя базальтсодержащая андезит-дацит-риолитовая известково-кремнисто-терригенная формация представлена алевролитами, песчаниками, туфопесчаниками, гравелитами, туфами кислого состава, туффитами, редко лавами и лавобрекчиями риолитов, риодацитов, андезитов, андезибазальтов. В состав верхней базальт-риолитовой кремнисто-терригенной формации входят риолиты, дациты, риодациты, андезиты, андезибазальты, их лавобрекчии; туфы кислого и основного составов, редко алевролиты, песчаники, туфопесчаники, тефроиды, аргиллитов [14, 15, 16, 19, 20].

В пределах Китайского Алтая рудоносными являются следующие формации: нижнедевонская Кангбутибао (Kangbutiebao) (ранний цикл вулканической активности, соответствует нижней формации в пределах Рудноалтайской МЗ), которая распространена наиболее широко, а также нижне-среднедевонская Ашеле (Ashele) (поздний цикл вулканической активности, соответствует верхней

формации в пределах Рудноалтайской МЗ) (рис. 7). Формация Кангбутибао в основном состоит из кислых вулканогенных пород (риолиты, риодациты, дациты, туфы), а также небольшого количества осадочных пород (метапесчаники, сланцы) [34, 43, 44, 55, 56, 58, 64, 66–68, 70, 71]. В пределах формации Ашеле широко развиты бимодальные вулканогенные породы, представленные андезитами, базальтами, реже дацитами, риолитами, брекчиевыми и осадочными туфами, туфопесчаниками, известняками [42, 51, 69].

Рудовмещающие (рудоносные?) отложения Монгольского Алтая (Делуун-Сагсайская (Deluun-Sagsay) металлогеническая зона) представлены породами раннедевонской формации Отог (Otog) и нижне-среднедевонской формации Бааст-Уул (Baast uul) (ранний цикл вулканической активности, соответствует нижней формации в пределах Рудноалтайской МЗ). Формация Отог сложена вулканогенно-осадочными породами, такими как риолиты и их туфы, дациты, риодациты, андезиты, базальты, конгломераты, туфоалевролиты и туфопесчаники. В разрезе формации Бааст-Уул выделяются туфопесчаники, риолиты, их туфы и туфобрекчии, андезиты, реже псаммитовые туфы и гравелиты [39, 57].

На основе собственных материалов, а также данных других исследователей, согласно металлогеническому кодексу РФ [23], в пределах Большого Алтая были выделены 11 рудных районов с месторождениями типа VMS (рис. 8). Они были оконтурены по полям развития рудоносных формаций девонского возраста в пределах палеопроегибов. С северо-запада на юго-восток выделяются: Рубцовский, Золотушинский, Змеиногорский (Российская Федерация), Лениногорский, Прииртышский, Зырянский (Республика Казахстан), Ашеле (бассейны Ашеле (Ashele basin) и Чонгуер (Chonghuer basin)), Келан (Kelang basin) и Майзи (Maizi basin)

Рис. 6. Схематическая формационная карта северо-западной части Большого Алтая с месторождениями типа VMS, с использованием материалов [20]:

1–2 – рудоносные формации: 1 – базальтсодержащая андезит-дацит-риолитовая известково-кремнисто-терригенная ($D_1e-D_2gv_1$) (ранний цикл вулканической активности), 2 – контрастная базальт-риолитовая кремнисто-терригенная ($D_2gv_2-D_3f_1$) (поздний цикл вулканической активности); 3 – подрудные отложения основания (предположительно, нижнепалеозойского возраста); 4 – перекрывающие отложения (D_3-C_1 , без расчленения); 5 – гранитные комплексы (без расчленения); 6 – габбро-диабазы (без расчленения); 7 – пограничные с Рудноалтайской зоны; 8 – разрывные нарушения; 9 – государственные границы; 10 – месторождения типа VMS; 11 – рудные районы (числа в кружках): 1 – Рубцовский, 2 – Золотушинский, 3 – Змеиногорский (Российская Федерация), 4 – Лениногорский, 5 – Прииртышский, 6 – Зырянский (Республика Казахстан)

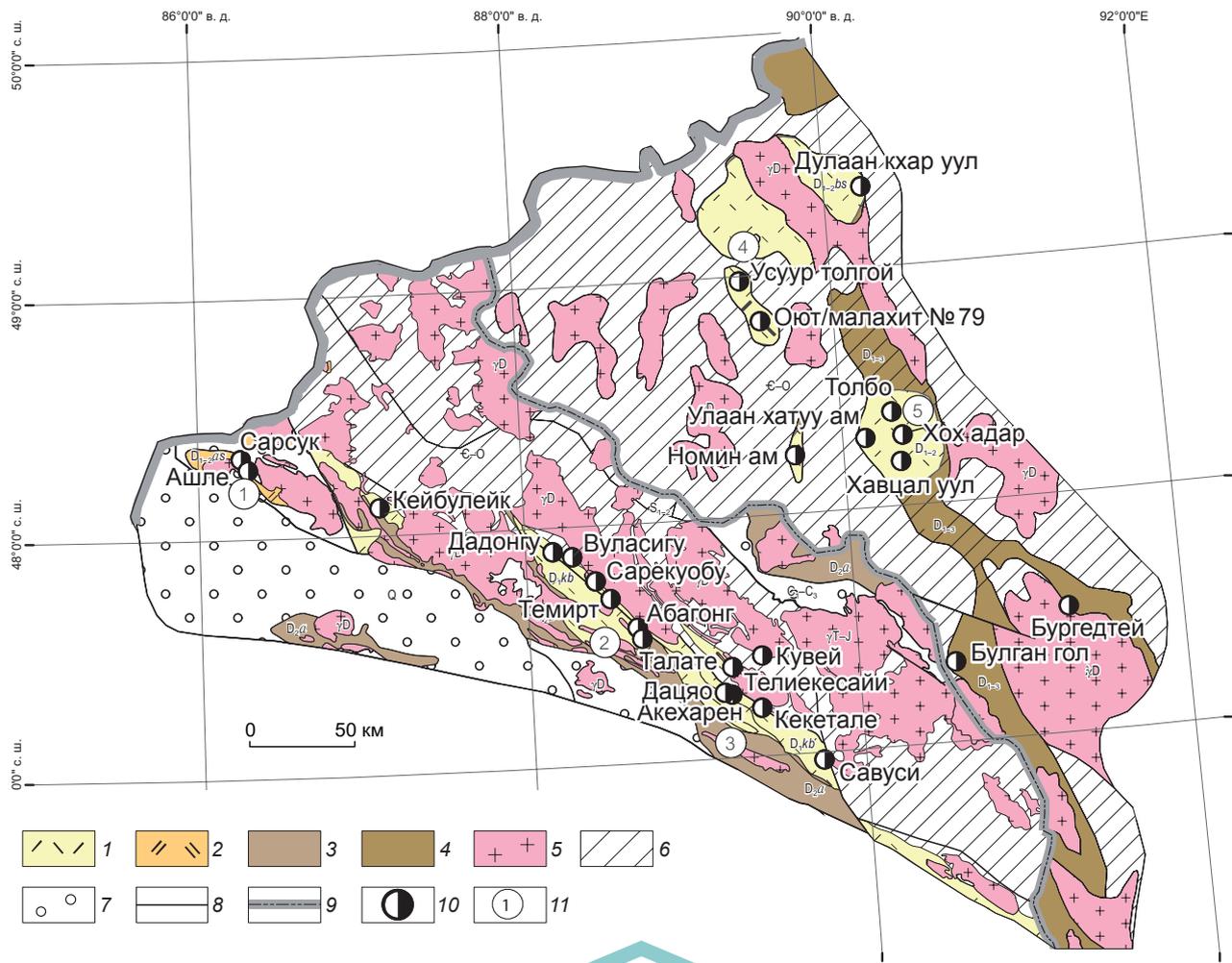


Рис. 7. Схематическая формационная карта юго-восточной части Большого Алтая с месторождениями типа VMS, с использованием материалов [34, 39, 65]:

1–2 – рудоносные формации: 1 – формация Кангбутибао ($D_{1lx-pr}-D_{1e}$) (Китайская Народная Республика) и формация Бааст уул ($D_{1pr}-D_{2ef}$) (Монголия) (ранний цикл вулканической активности), 2 – формация Ашеле ($D_{1e}-D_{2ef}$) (Китайская Народная Республика) (поздний цикл вулканической активности) ($D_{2gv_2}-D_{3f_1}$); 3 – формация Алтай (D_{2a}) (Китайская Народная Республика); 4 – девонские вулканогенно-осадочные отложения (D_{1-2} , без расчленения) (Монголия); 5 – гранитные комплексы (без расчленения); 6 – подрудные отложения основания ($\epsilon-O$); 7 – перекрывающие отложения (без расчленения); 8 – разрывные нарушения; 9 – государственные границы; 10 – месторождения типа VMS; 11 – рудные районы (числа в кружках): 1 – Ашеле (бассейны Ашеле (Ashele basin) и Чонгхуер (Chonghuer basin)), 2 – Келан (Kelang basin), 3 – Майзи (Maizi basin) (КНР), 4 – Дулаан кхар уул (Dulaan khar uul), 5 – Хох адар (Khokh adar)

(КНР), Дулаан кхар уул (Dulaan khar uul) и Хох адар (Khokh adar) рудные районы. Таким образом, они эквиваленты структурно-формационным блокам в пределах металлогенических зон и представляют собой крупные вулканогенно-осадочными отложениями одной (или двух) рудоносных формаций. Мощность отложений рудоносных формаций

коррелирует с интенсивностью прогибания основания и достигает максимальных величин в центральной части Большого Алтая на территории Республики Казахстан. Важным фактором для локализации промышленного оруденения являются соотношения в составе формаций вулканитов основного (среднего) и кислого состава, а также карбонатно-терригенных и вулканогенных пород.

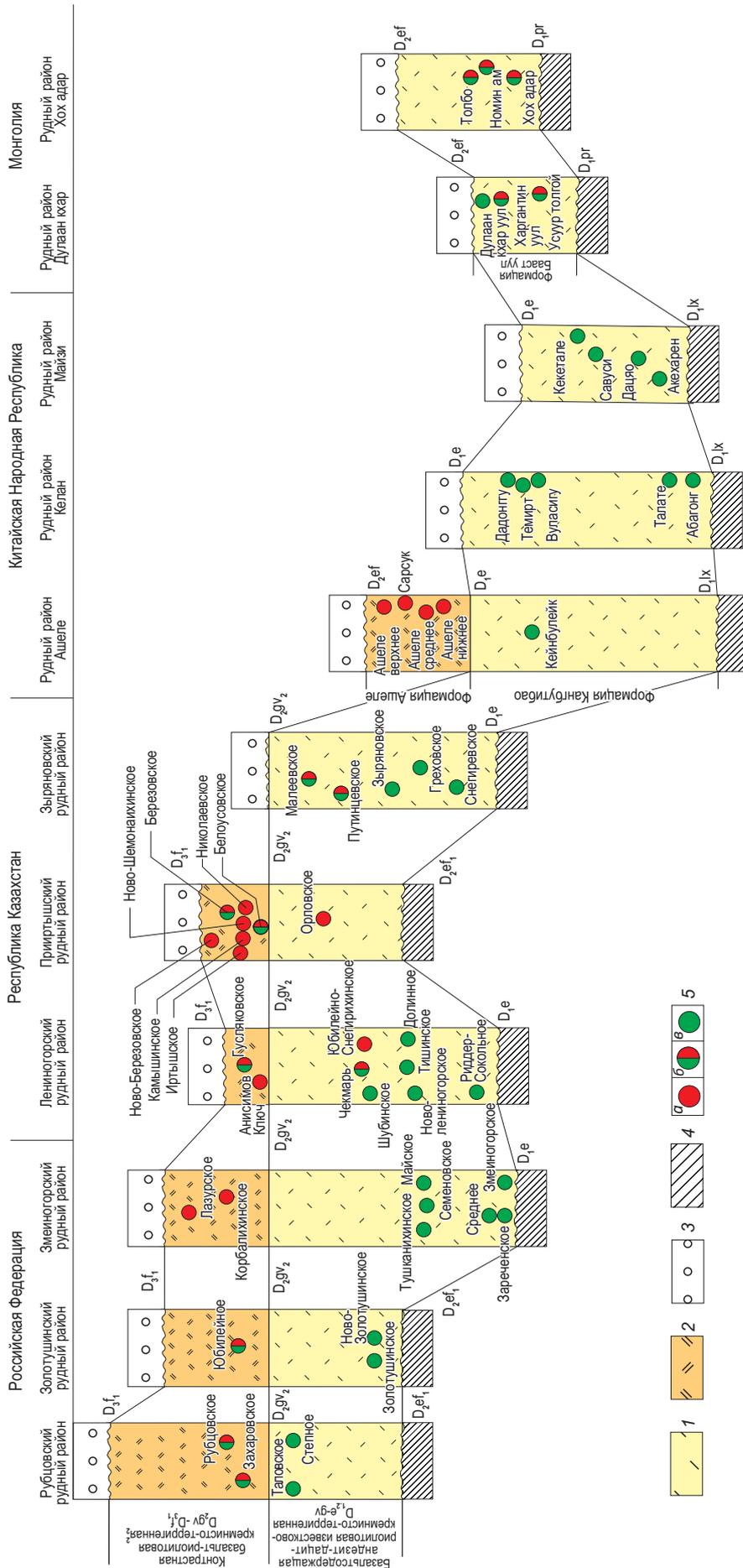


Рис. 8. Схематические формационные колонки для рудных районов Большого Алтая, в пределах которых выявлены месторождения типа VMS, с использованием материалов [10, 20, 34, 42–44, 51, 55, 56, 58, 64, 66, 67, 68, 69, 70, 71]:

1–2 – рудоносные формации: 1 – базальтсодержащая андезит-дацит-риолитовая известково-кремнисто-терригенная (D_1e – D_2g_2) (Российская Федерация и Республика Казахстан), аналоги: формация Кангубтао (D_1x – rg – D_1e) (Китайская Народная Республика) и формация Бааст уул (D_1pr – D_2ef) (Монголия), 2 – контрастная базальт-риолитовая кремнисто-терригенная (D_2g_2 – D_3f_1) (Российская Федерация и Республика Казахстан), аналог: формация Ашеле (D_1e – D_2ef) (Китайская Народная Республика); 3 – перекрывающие формации (D_3 – J_2); 4 – подрудные отложения основания (предположительно, нижнелеозойского возраста); 5 – рудные формации: медно-свинцово-цинковая колчеданная: сфалерит-халькопирит-пиритовый (а) и халькопирит-галенит-сфалерит-пиритовый (б) минеральные типы, свинцово-цинковая колчедансодержащая рудная формация: галенит-сфалерит-баритовый и галенит-сфалеритовый пиритсодержащие минеральные типы (в)

Петрохимические особенности рудовмещающих пород. Изучение петрохимических особенностей рудоносных формаций месторождений типа VMS Большого Алтая было основано на созданной базе химических анализов, охватывающей кислые (450 анализов), а также средние и основные (52 анализа) разности пород. Данные были структурированы по рудным районам (Рубцовский, Золотушинский, Змеиногорский, Лениногорский, Прииртышский, Зыряновский, Ашеле, Келан, Майзи) и формациям (нижняя, верхняя). Для каждой пробы в базе приведены концентрации основных оксидов, а также BaO, общая сера и расчётные параметры, такие как: $K_2O + Na_2O$, K_2O/Na_2O , $FeO + 0,9Fe_2O_3$ (аналог общего железа FeO_t), а также $FeO + 0,9Fe_2O_3/MgO$ (показатель дифференциации).

Нижняя формация ($D_1e-D_2gv_1$ – Российская Федерация и Республика Казахстан; $D_1lx-pr-D_1e$ – Китайская Народная Республика).

Нижняя базальтсодержащая андезит-дацит-риолитовая известково-кремнисто-терригенная формация развита в пределах Большого Алтая повсеместно. Данные охватывают два основных класса пород:

1. Кислые разности (риолиты, дациты): преобладают в разрезе (большинство анализов). Характеризуются высоким содержанием SiO_2 (65–85 %), умеренным Al_2O_3 (8–20 %) и переменным соотношением щелочей ($K_2O + Na_2O = 1–15$ %).

2. Средние и основные разности (андезиты, базальты) встречаются реже. Отличаются пониженным SiO_2 (36–62 %), повышенными содержаниями FeO_t , MgO и CaO (до 28, 10 и 15 % соответственно).

Ключевые геохимические тренды.

1. Щелочная специализация: выявлены как калиевые ($K_2O > Na_2O$, например, в Зыряновском районе K_2O/Na_2O достигает 8,0), так и натриевые серии ($Na_2O > K_2O$, например, в Змеиногорском районе K_2O/Na_2O составляет ~0,1–0,5). Общий индекс щёлочности ($K_2O + Na_2O$) демонстрирует значительный разброс.

2. Ферромагнезиальные компоненты: отношение $FeO + 0,9Fe_2O_3/MgO$ варьирует от очень низких значений (< 1) в высококремнезёмистых разностях до высоких (> 10) в некоторых основных породах. Это отражает кристаллизационную эволюцию: от ранних Mg-богатых фаз к Fe-обогащённым остаточным расплавам. В основных породах фиксируются повышенные концентрации TiO_2 (до 1,5 %).

Региональные вариации (особенности).

1. Змеиногорский район: преимущественно кислые породы с умеренной щёлочностью и вариативным содержанием FeO, MgO.

2. Золотушинский район: кислые породы с тенденцией к повышенной щёлочности.

3. Лениногорский район: широкий спектр – от кислых до средних пород; встречаются обогащённые глинозёмом ($Al_2O_3 > 20$ %) и железистые разности.

4. Зыряновский район: ярко выраженные калиевые кислые породы (K_2O/Na_2O часто > 2 , достигает 9,12).

5. Район Ашеле (бассейн Чонгуэр): высококремнезёмистые (SiO_2 часто > 78 %) и высоконатриевые (Na_2O до 5,78 %) риолиты.

6. Район Келан: представлены как высокодифференцированные кислые, так и менее дифференцированные средние породы.

7. Район Майзи: кислые породы с умеренной щёлочностью и переменным Fe/Mg.

По данным химических анализов, для нижней базальтсодержащей андезит-дацит-риолитовой известково-кремнисто-терригенной формации были составлены диаграммы [30], характеризующие петрохимические особенности вулканогенных пород, которые представлены на рис. 5.

Диаграмма TAS (Total Alkali-Silica) демонстрирует состав пород по содержанию кремнезёма (SiO_2) и щелочей ($Na_2O + K_2O$). Распределение точек на диаграмме позволяет отнести породы формации к ряду от базальтов до риолитов, что подтверждает их принадлежность к непрерывной ассоциации. Наличие базальтовых разностей указывает на участие более мафических магм в формировании комплекса. Диаграмма K_2O-Na_2O для кислых магматических пород отражает соотношение калия и натрия, что важно для понимания их петрогенезиса. Распределение точек на диаграмме свидетельствует о преобладании калия над натрием и принадлежности пород к известково-щелочной серии. Диаграмма А. Мияширо, основанная на соотношении $(FeO + 0,9Fe_2O_3)/MgO$ и TiO_2 , позволяет разделить толеитовые и известково-щелочные серии. Расположение точек на диаграмме показывает принадлежность пород к известково-щелочной серии, что согласуется с данными диаграммы K_2O-Na_2O . Линии дифференциации вулканитов указывают на фракционирование оливина и пироксена в мафических магмах. Диаграмма AFM (Alkali-FeO*-MgO), где $FeO^* = FeO + 0,9Fe_2O_3$, иллюстрирует эволюцию

магматических серий. Распределение точек подтверждает известково-щелочной характер формации, с чётким трендом дифференциации от мафических к кислым составам, что характерно для антидромного типа вулканизма. Это свидетельствует о сложных процессах кристаллизационной дифференциации и возможном участии корового материала в магмообразовании.

Исходя из вышеизложенного можно сделать вывод, что нижняя формация является непрерывной, относится к калий-натриевой серии с преобладанием калия над натрием. Исключение составляют кислые породы, развитые в пределах рудных районов Майзи и Зырянский. Поведение основных петрогенных окислов свидетельствуют о том, что вулканогенные породы относятся к известково-щелочной серии (рис. 9).

Верхняя формация ($D_2gy_2-D_3f_1$ – Российская Федерация и Республика Казахстан; D_1e-D_2ef – Китайская Народная Республика).

Верхняя базальт-риолитовая кремнисто-терригенная формация развита в пределах Большого Алтая ограниченно. В разрезе доминируют породы кислого состава (риолиты, дациты, реже риодациты), что подтверждается высокими содержаниями кремнезёма (SiO_2). Подавляющее большинство проб характеризуется значениями SiO_2 в диапазоне 70–80 %, что типично для кислого вулканизма. Содержания глинозёма (Al_2O_3) варьируются в основном от 10 до 14 %, что также соответствует кислому составу.

Группа средних и основных пород представлена меньшим числом проб. Они характеризуются: пониженным SiO_2 (44–56 %), повышенными содержаниями Fe_2O_3 (3–13 %), FeO (6–9 %), MgO (2–14 %) и CaO (1–11 %). Сумма щелочей ($Na_2O + K_2O$) ниже, чем в кислых породах (1–7 %), с преобладанием натрия (K_2O/Na_2O часто $< 0,5$). Также отмечаются высокие значения параметра $0,9 \times (Fe_2O_3 + FeO)$ и магнезиальности, отражающие основной состав.

Ключевые геохимические тренды.

1. Щелочная специализация: значения суммы щелочей демонстрируют значительный разброс: от ~ 3 до 15 %, однако большая часть проб попадает в интервал 5–8 %. Это указывает на преимущественно нормальную или умеренно повышенную щёлочность основной массы пород. Соотношение K_2O/Na_2O варьируется от 0,1 до 7,5.

2. Ферромагнезиальные компоненты: отношение $0,9 \times (Fe_2O_3 + FeO)/MgO$ сильно варьируется по районам. Змеиногорский район: широкий раз-

брос от ~ 1 до > 30 , что указывает на присутствие как примитивных, так и высокодифференцированных разностей; Золотушинский, Рубцовский, Прииртышский районы: значения преимущественно выше 5, часто > 10 , что характерно для дифференцированных кислых магм; район Ашеле: значения преимущественно ниже 5, что может указывать на менее дифференцированный характер магм.

Региональные вариации (особенности).

1. Змеиногорский район: наиболее представительная выборка, характеризуется максимальным разнообразием геохимических параметров, особенно по щелочам (K_2O/Na_2O) и магнезиальности. Встречаются как высококалийевые ($K_2O/Na_2O > 3$), так и умеренно натриевые разности.

2. Золотушинский район: породы имеют в целом схожий со Змеиногорским районом кислый состав, но часто с несколько более низкими содержаниями K_2O и умеренными значениями K_2O/Na_2O (часто $< 1,5$). Отмечаются повышенные содержания общего железа (до 8,22 %).

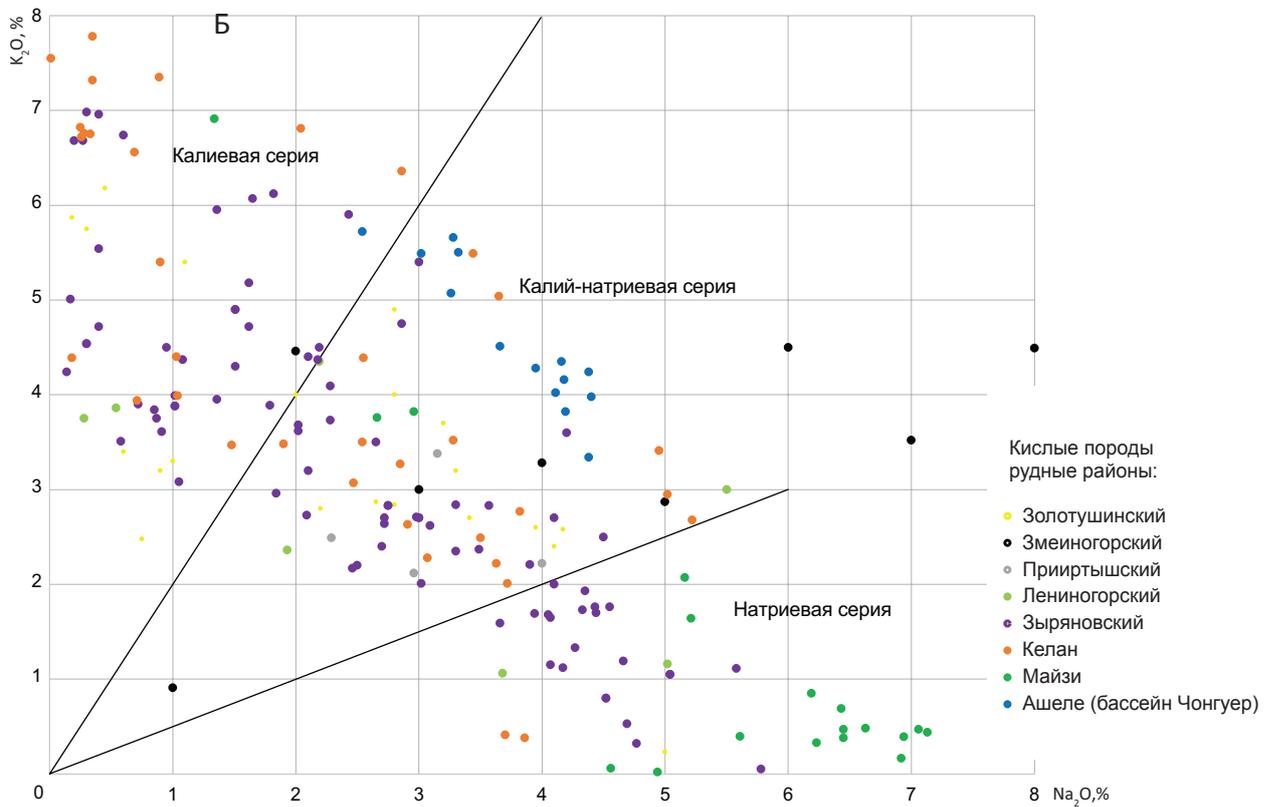
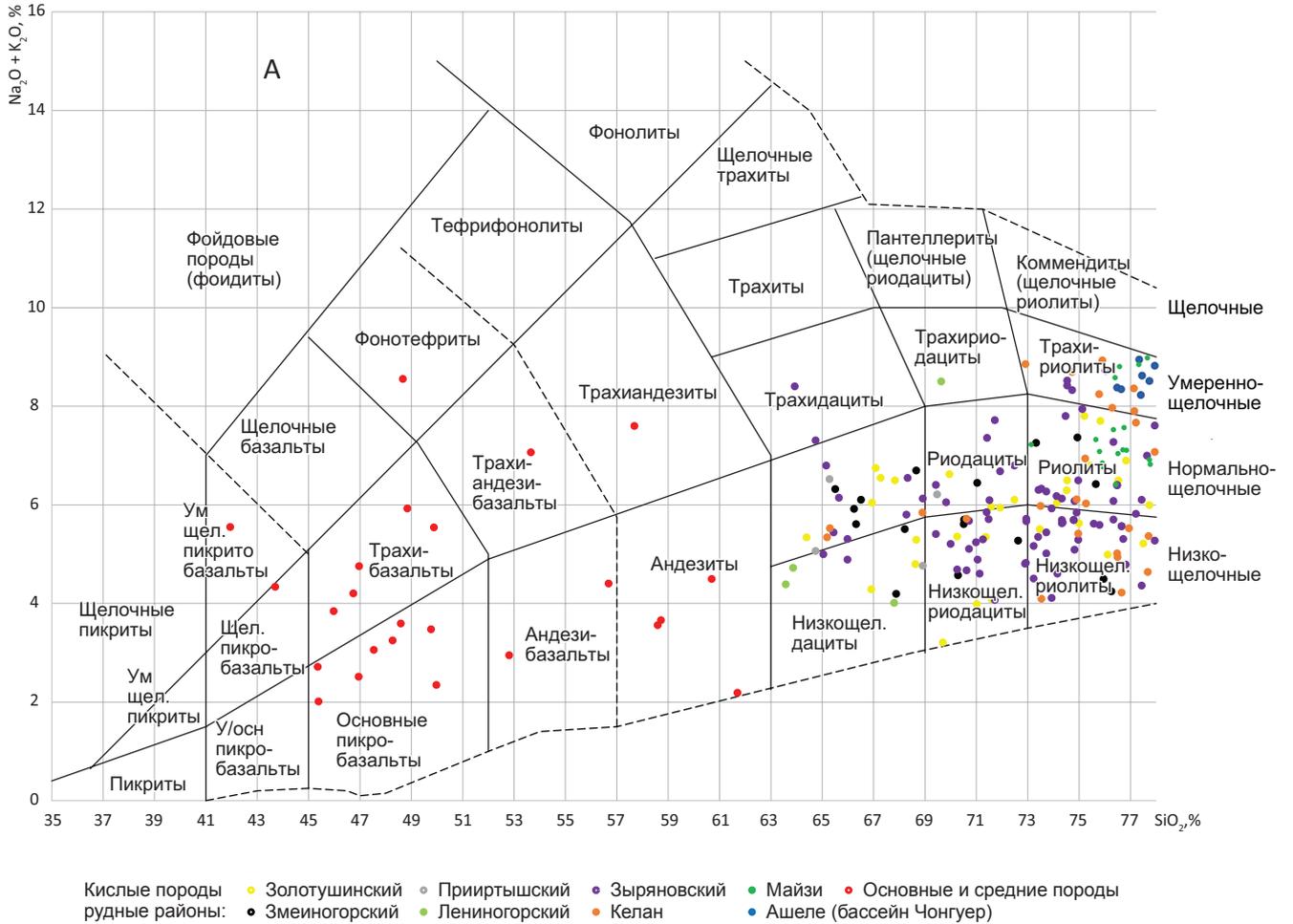
3. Рубцовский район: анализы показывают умеренно калиевый характер (K_2O/Na_2O часто 1–2) и высокую магнезиальность (> 5).

4. Прииртышский район: данные представлены двумя типами: а. типичные кислые породы с высоким SiO_2 (> 70 %) и K_2O/Na_2O от 0,5 до 3,5; б. существенно основные разности ($SiO_2 \sim 35$ –60 %) с очень высокими содержаниями Fe_2O_3 (до 12,55 %) и MnO (до 14,78 % в одной из проб).

5. Район Ашеле: значения K_2O/Na_2O преимущественно очень низкие ($< 0,2$), что нехарактерно для основной массы кислых пород формации. Основные породы в этом районе (базальты/андезибазальты) имеют низкие содержания щелочей и высокие MgO , CaO .

На рис. 10 представлены петрохимические диаграммы, иллюстрирующие состав и эволюционные тренды вулканогенных пород верхней базальт-риолитовой кремнисто-терригенной формации. Распределение точек на диаграмме TAS указывает на контрастный тип формации. Умеренное содержание щелочей ($Na_2O + K_2O$) при $SiO_2 > 60$ % отражает тенденцию к калиево-натриевому балансу. Диаграмма K_2O-Na_2O для кислых пород подчёркивает роль калиевой компоненты в эволюции кислых магм. Большинство образцов попадает в поле среднекалийевых известково-щелочных серий ($K_2O/Na_2O \approx 0,5$ –2). Диаграмма А. Мияширо чётко разделяет магматические серии. Точки образуют кластер в поле известково-щелочных серий, согласуясь

Месторождения рудных и нерудных полезных ископаемых



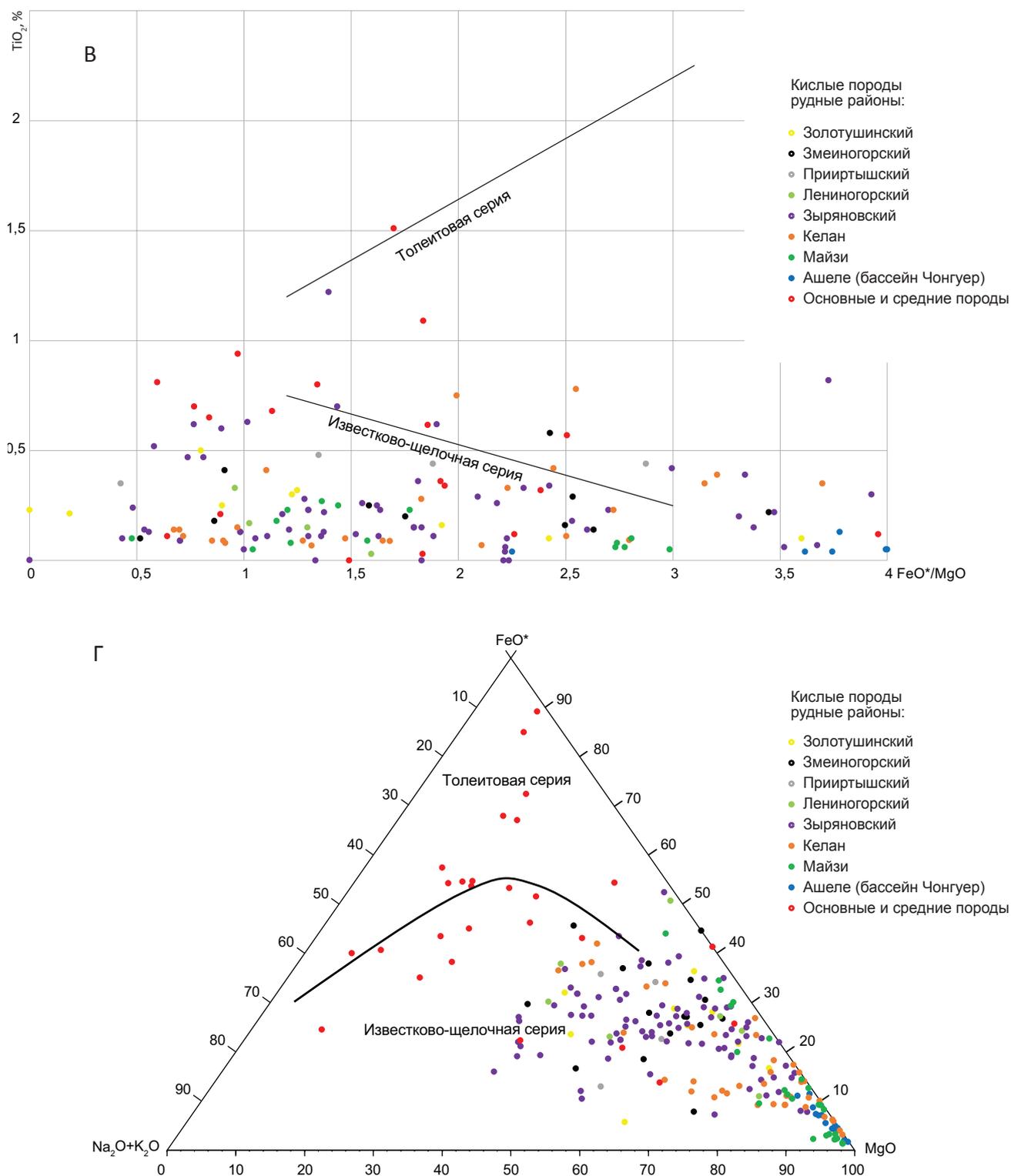
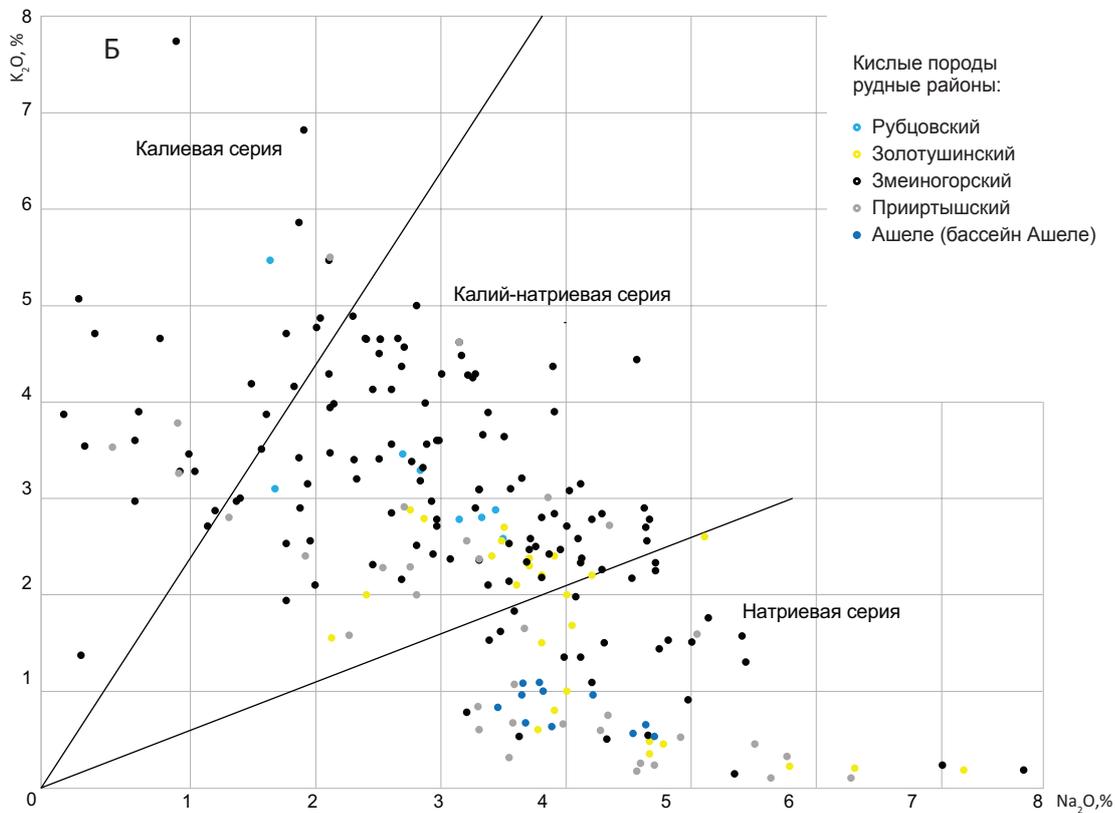
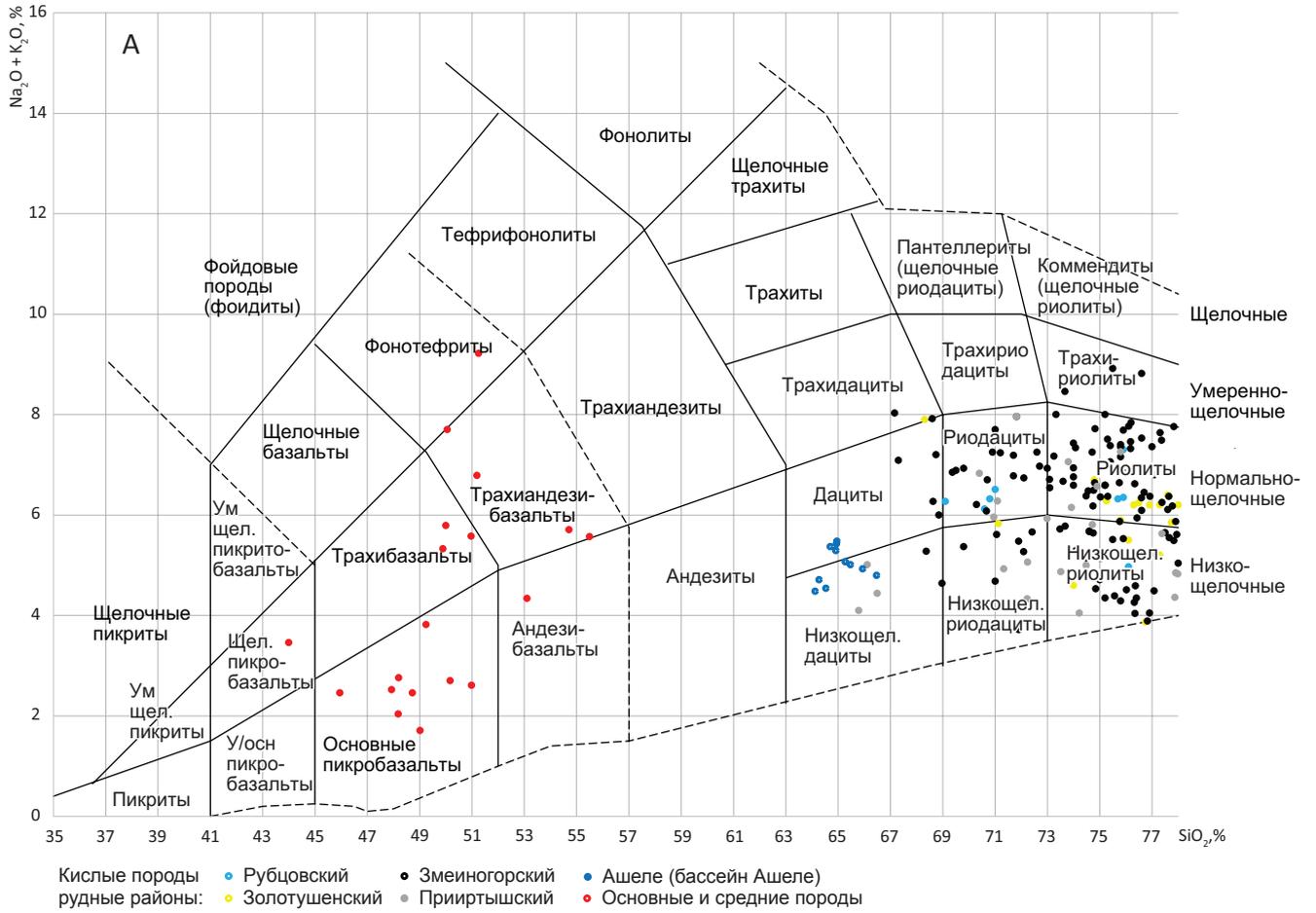


Рис. 9. Петрохимические особенности вулканогенных пород нижней базальтсодержащей андезит-дацит-риолитовой известково-кремнисто-терригенной формации:

А – диаграмма TAS (Total Alkali-Silica); Б – диаграмма K_2O-Na_2O для кислых магматических пород; В – диаграмма А. Мияширо для разделения толеитовых и известково-щелочных серий по соотношению $(FeO + 0,9Fe_2O_3)/MgO-TiO_2$; Г – диаграмма AFM (Alkali-FeO*-MgO) : $FeO^* = FeO + 0,9Fe_2O_3$

Месторождения рудных и нерудных полезных ископаемых



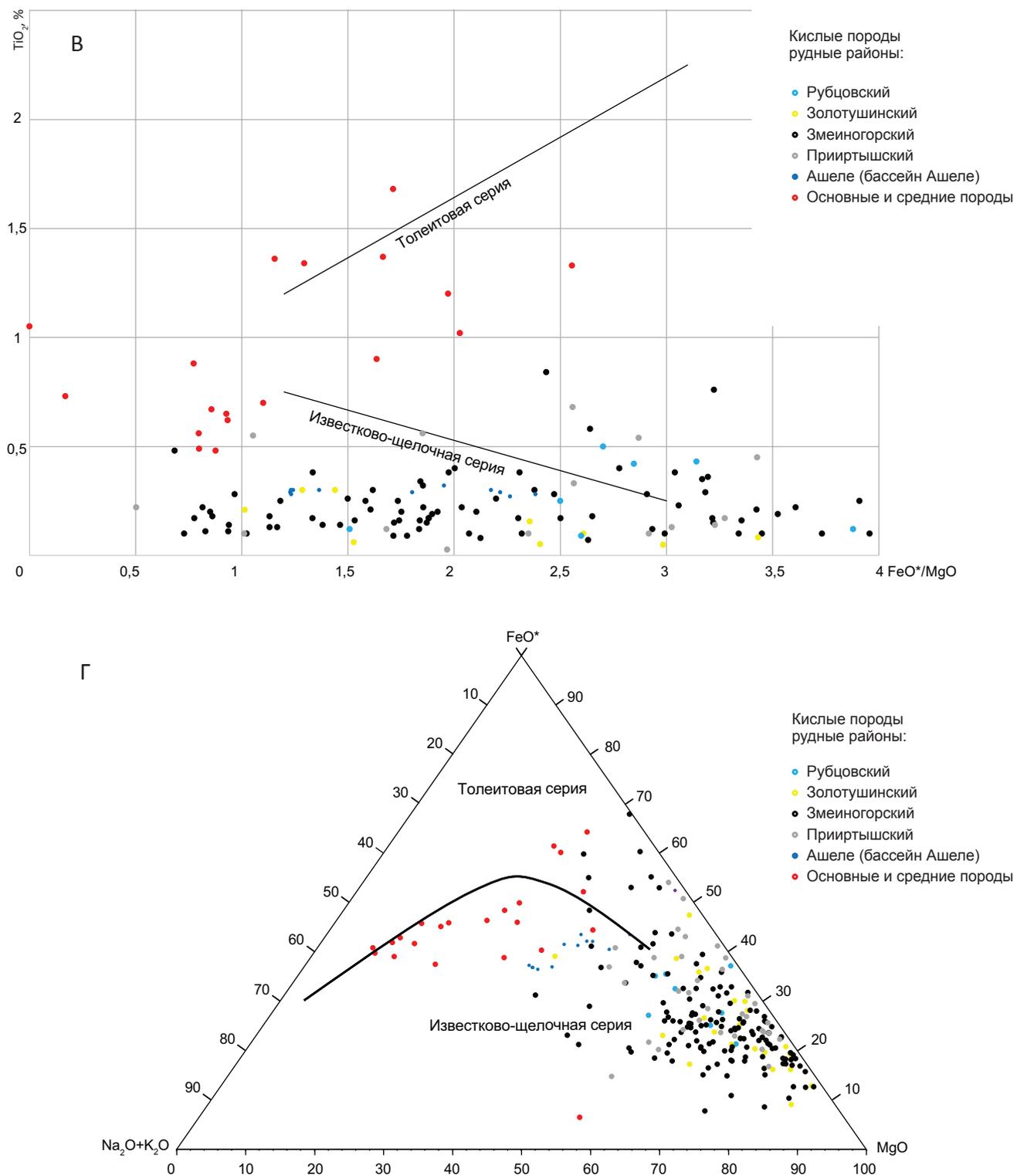


Рис. 10. Петрохимические особенности вулканогенных пород верхней базальт-риолитовой кремнисто-терригенной формации:

А – диаграмма TAS; Б – диаграмма K₂O–Na₂O для кислых магматических пород; В – диаграмма А. Мияширо для разделения толеитовых и известково-щелочных серий по соотношению (FeO + 0,9Fe₂O₃)/MgO–TiO₂; Г – диаграмма AFM (FeO* = FeO + 0,9Fe₂O₃)

с данными диаграмм TAS и K_2O-Na_2O . Также отмечаются низкие значения TiO_2 ($< 1,5 \%$) и умеренное $(FeO^*)/MgO$ (1–3). Распределение на диаграмме AFM подтверждает доминирование известково-щелочной тенденции. Тренд направлен от MgO -богатых составов (мафические магмы) к полю щелочей (кислые дифференциаты). Отсутствие значительного обогащения FeO^* исключает толеитовую природу.

Следовательно, верхняя базальт-риолитовая кремнисто-терригенная формация является контрастной, относится к калиево-натриевой серии, при почти равном соотношении калия и натрия. Исключение составляют кислые породы, развитые в пределах рудного района Ашеле. Вулканогенные породы относятся к известково-щелочной серии.

Проанализировав петрохимические особенности вулканогенных пород нижней и верхней формаций, можно выделить как сходства, так и различия.

Общие черты:

- доминирование пород кислого состава: обе формации характеризуются преобладанием кислых вулканитов (риолиты, риодациты, дациты) с высоким содержанием SiO_2 (65–85 %);

- щелочная вариабельность: в обеих формациях наблюдается широкий разброс по щёлочности ($K_2O + Na_2O = 1–15 \%$) и соотношению K_2O/Na_2O (от 0,1 до > 8). Вулканогенные породы обеих формаций относятся к известково-щелочной серии.

- дифференциация магм: высокие значения параметра $(FeO + 0,9Fe_2O_3)/MgO$ (> 10) в обеих формациях указывают на кристаллизационную дифференциацию. Верхняя формация демонстрирует более интенсивную дифференциацию, а нижняя включает менее эволюционировавшие разности.

Ключевые различия:

- нижняя формация последовательная, имеет калиевую специализацию, а верхняя – контрастная калиево-натриевая;

- содержание глинозёма (Al_2O_3) в нижней формации умеренное (10–14 %), а в верхней формации этот диапазон значительно шире – от 8 до 20 %.

Геодинамическая обстановка формирования. Полученные петрохимические особенности вулканогенных пород важны для рекон-

струкции геодинамической обстановки формирования исследуемых формаций. Месторождения типа VMS образуются в различных условиях [40, 41, 53]. Генезис и условия образования этих объектов в пределах Большого Алтая подробно изучается российскими, казахстанскими и китайскими исследователями [5, 7, 16, 17, 20–22, 26, 32, 34, 38, 47, 56, 65].

Приведённые выше геохимические данные по вулканогенным породам содержат ряд характерных признаков, указывающих на их формирование в рифтогенной обстановке. Прежде всего, это проявляется в выраженной биполярности состава пород, где наряду с преобладающими высококремнезёмистыми кислыми разностями присутствуют подчинённые основные породы, что типично для континентальных рифтовых зон. Особенно показательно присутствие в нижней формации андезибазальтов с повышенными содержаниями TiO_2 (до 1,5 %) и железа, что характерно для магм, связанных с растяжением коры.

Также важным аргументом в пользу данной гипотезы служит резкая изменчивость щёлочности пород как между формациями, так и внутри них. В нижней формации отмечаются крайние значения – от резко калиевых (в Зырянском районе) до натриевых разностей (бассейн Чонгуэр), что отражает сложные процессы взаимодействия коровых и мантийных расплавов в условиях растяжения. Верхняя формация демонстрирует более однородную, но всё же вариабельную щелочную специализацию, что может указывать на более зрелые стадии рифтогенеза с преобладанием коровых источников.

Характер дифференциации магм также подтверждает рифтогенную модель. Высокие значения параметра $(FeO + 0,9Fe_2O_3)/MgO$ часто > 10 , особенно в кислых разностях верхней формации, свидетельствуют о длительной эволюции расплавов в магматических камерах, что типично для рифтовых структур с их продолжительной тектономагматической активностью. При этом присутствие в нижней формации менее дифференцированных разностей $((0,9Fe_2O_3 + FeO)/MgO < 1)$ может отражать начальные этапы рифтинга с поступлением более примитивных мантийных магм.

Особого внимания заслуживают уникальные $Fe-Mn$ -обогащённые основные породы Прииртышья в верхней формации. Их состав с высокими содержаниями Fe_2O_3 (до 12,55 %) и MnO (до 14,78 %) может быть связан с процессами контаминации ко-

ровых материалов или воздействием флюидов в условиях рифта, где часто развивается интенсивная гидротермальная деятельность. Аналогично аномально высокие содержания летучих компонентов (H_2O до 6,62 %, CO_2 до 4,29 %) в породах бассейна Ашеле верхней формации указывают на активную роль флюидного режима, характерного для рифтовых систем.

Пространственная зональность геохимических параметров также является индикатором рифтогенной обстановки. Резкие различия между районами могут отражать развитие отдельных сегментов рифта с разной степенью контаминации корового материала и различной глубиной заложения магматических очагов. При этом общая тенденция к увеличению степени дифференциации и однородности состава от нижней к верхней формации соответствует эволюции рифтогенной системы от начальных стадий растяжения к более зрелым этапам развития.

Вывод о том, что вулканогенные породы рудоносных формаций сформировались в рифтогенной обстановке согласуются с результатами многих исследователей Большого Алтая. Так, в последних работах китайских учёных [56], изучающих породы, слагающие формацию Кангбутибао, была предложена модель формирования этих отложений. Эти исследователи считают, что большой объём кислых пород сформировался в условиях континентальной рифтовой дуги или задугового бассейна, а локальная экстензиональная обстановка была вызвана откатыванием плит Палеоазиатского океана. При таких обстоятельствах подъёму мафической магмы способствовали рифтогенные условия, которые впоследствии вызвали плавление как древней, так и ювенильной коры, что привело к активному континентальному дуговому магматизму. В частности, плавление более молодой ювенильной коры и одновременный подъём с ней мафической магмы привели к образованию бимодальных вулканических пород Кангбутибао.

Некоторые исследователи [63] высказывают точку зрения, что медно-цинково-колчеданные месторождения и рудопроявления, локализованные в пределах формации Ашеле, сформировались в островодужный этап развития структур.

Закономерности размещения месторождений типа VMS. Для анализа размещения месторождений типа VMS в пределах Большого Алтая была создана база, включающая данные по 57 объектам, в которой содержится информация о геологических

и рудных формациях, возрасте оруденения, а также средние содержания и запасы меди, свинца, цинка, золота и серебра. Собранные материалы позволили выявить ряд важных особенностей и закономерностей.

Главной особенностью является чёткая приуроченность всех колчеданно-полиметаллических, медно-цинковых и полиметаллических месторождений к девонскому периоду, что указывает на единый этап рудообразования. Российско-казахстанские объекты (Корбалихинское, Рубцовское, Таловское, Тишинское, Риддер-Сокольное, Зыряновское) преимущественно относятся к среднему девону (эйфельский-живетский-франский ярусы). Китайские и Монгольские месторождения (Ашеле, Кекетале, Темирт, Вуласигу, Дадонггу, Дулаан кхар уул) часто имеют датировки в диапазоне ~ 380–410 млн лет (ранний–средний девон), подтверждая синхронность процессов в разных частях Большого Алтая (см. рис. 4) [10, 20, 34, 42–44, 51, 55, 56, 58, 64, 66–70, 71].

Второй важной особенностью является разнообразие типов руд при их общей комплексности, что следует из описания типовых месторождений. В российской и казахстанской частях преобладают классические колчеданно-полиметаллические месторождения с богатыми запасами цинка, свинца, меди, часто с попутным серебром и золотом. Встречаются также барит-полиметаллические месторождения, отличающиеся высокими содержаниями золота и серебра. Китайский сегмент демонстрирует большее разнообразие: здесь распространены не только медно-цинковые и свинцово-цинковые колчеданные залежи, но и сложные железо-медно-свинцово-цинковые объекты [64, 68]. Монгольские месторождения также имеют полиметаллический состав. Практически все значимые месторождения содержат три и более ценных компонента (свинец, цинк, медь, серебро, золото), что делает руды комплексными [36, 39, 57].

С рудоносными геологическими формациями ассоциируют две соответствующие рудные формации: медно-свинцово-цинковая колчеданная рудная формация (нижняя) и колчедансодержащая рудная формация (верхняя). Общие суммарные запасы по уровням локализации оруденения сходны, но верхний уровень имеет медно-цинковую специализацию, а нижний – свинцово-цинковую (рис. 11).

Третья особенность касается распределения масштабов оруденения. Анализ запасов показал,

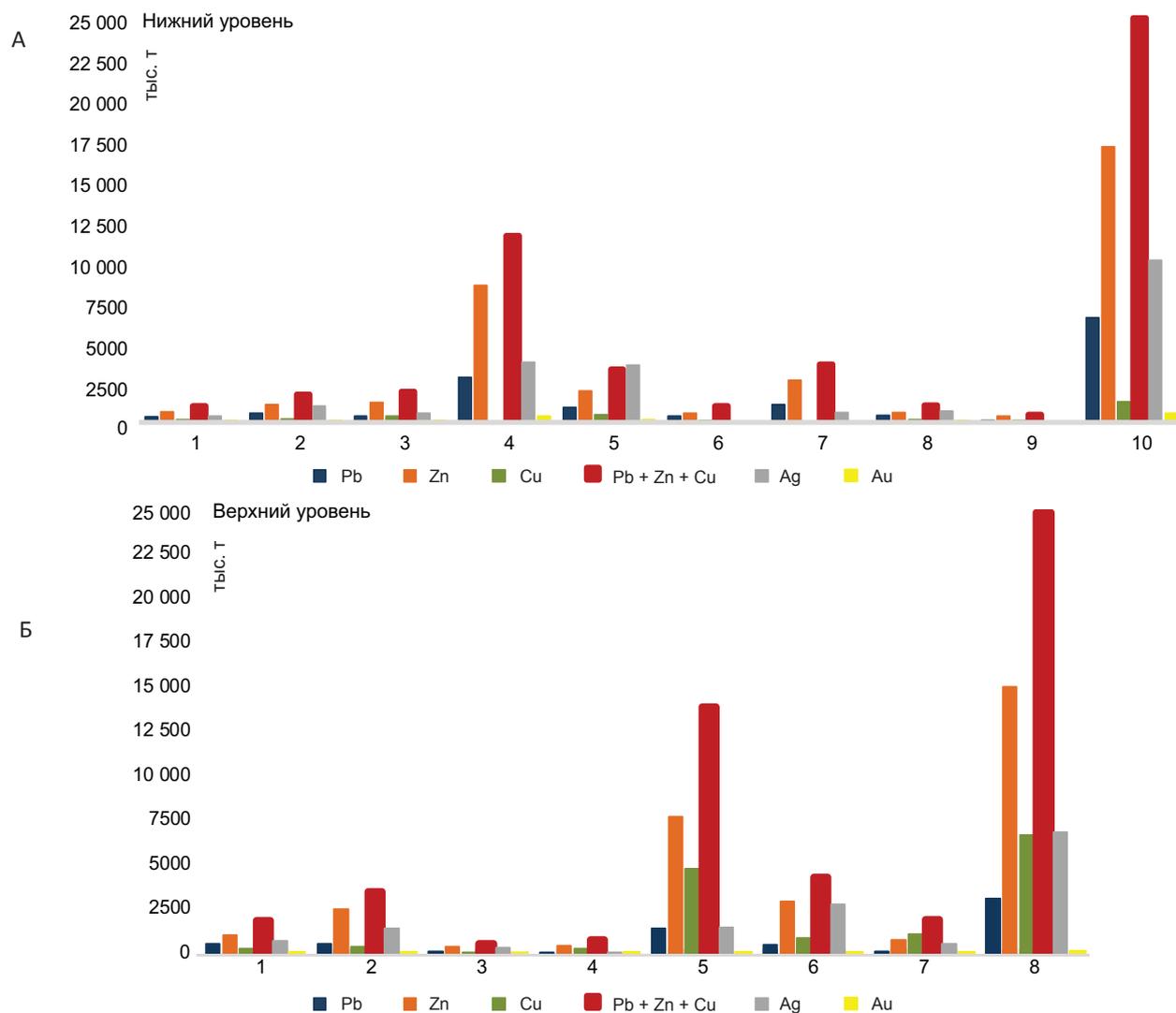


Рис. 11. Запасы металлов по уровням локализации оруденения в пределах Большого Алтая (месторождения типа VMS):

А – Нижний уровень, рудные районы: 1 – Рубцовский, 2 – Змеиногорский, 3 – Золотушинский, 4 – Лениногорский, 5 – Зыряновский, 6 – Келан, 7 – Майзи, 8 – Дулаан кхар уул, 9 – Хох адар, 10 – Нижний уровень: всего; Б – Верхний уровень, рудные районы: 1 – Рубцовский, 2 – Змеиногорский, 3 – Золотушинский, 4 – Лениногорский, 5 – Прииртышский, 6 – Зыряновский, 7 – Ашеле (бассейн Ашеле), 8 – Верхний уровень: всего

что наиболее крупные скопления металлов сосредоточены в центральной части Большого Алтая (Прииртышский и Лениногорский рудные районы), а на северо-запад и юго-восток их количество значительно снижается (рис. 12, А). Продуктивность (тыс. т/км²) рудоносных формаций колеблется от 0,8 до 3,7 в юго-восточной части Большого Алтая, от 3,5 до 5,6 в северо-западной и дости-

гает своих максимальных значений (10,2–26,8) в центральной (см. рис. 12, Б).

Китайские исследователи [56] называют причиной того, что в месторождениях типа VMS, локализованных в пределах формации Кангбутибао, выявлены небольшие запасы меди, свинца, цинка в сравнении с аналогичными объектами по всему миру, неблагоприятные условия формирования

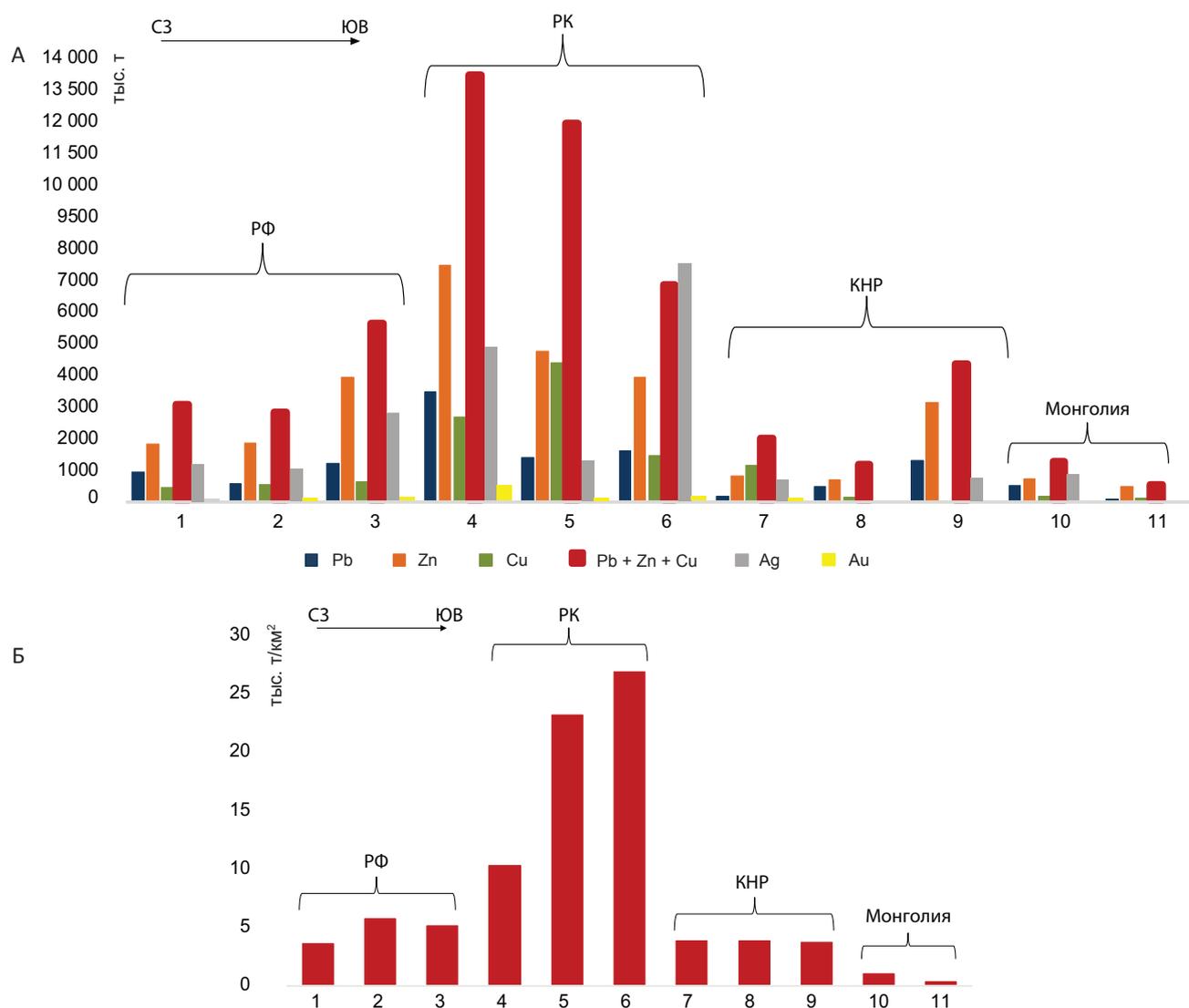


Рис. 12. Распределение оруденения в пределах рудных районов Большого Алтая (месторождения типа VMS):

А – запасы свинца, цинка, меди, серебра и золота, рудные районы: 1 – Рубцовский, 2 – Золотушинский, 3 – Змеиногорский, 4 – Лениногорский, 5 – Прииртышский, 6 – Зыряновский, 7 – Ашеле, 8 – Келан, 9 – Майзи, 10 – Дулаан кхар уул, 11 – Хох адар; Б – продуктивность рудных формаций, рудные районы: 1 – Рубцовский, 2 – Золотушинский, 3 – Змеиногорский, 4 – Лениногорский, 5 – Прииртышский, 6 – Зыряновский, 7 – Ашеле, 8 – Келан, 9 – Майзи, 10 – Дулаан кхар уул, 11 – Хох адар

оруденения. Они сделали вывод, что подстилающие вулканогенно-осадочные породы характеризуются низкими содержаниями металлов и были сформированы в условиях низкого теплового потока, что сделало невозможным эффективную гидротермальную инфильтрацию и циркуляцию.

Обсуждение результатов. История термина «Большой Алтай» отражает эволюцию научного

понимания этой горной системы как единого геологического и металлогенического региона, охватывающего территории Российской Федерации, Республики Казахстан, Китайской Народной Республики и Монголии. Исследование полиметаллических месторождений этого региона имеет многовековую историю, тесно связанную с промышленным развитием, геологическими открытиями и

международным сотрудничеством. Большой Алтай известен богатыми залежами свинца, цинка, меди, серебра, золота и редких металлов. В его пределах в настоящее время выявлены 16 крупных колчеданно-полиметаллических месторождений типа VMS. В тексте статьи приведены описания типовых месторождений, выявленных в пределах казахстанской и китайской частей Большого Алтая (Тишинское, Малеевское, Ашеле и Кекетале).

Российско-казахстанская часть Большого Алтая представлена в основном «классическими» девонскими колчеданными месторождениями рудноалтайского типа. Объекты барит-полиметаллического типа характеризуются повышенными содержаниями золота и серебра. Китайская часть (особенно рудный район Келан) характеризуется большим разнообразием типов, часто более сложной геологией и метаморфизмом руд, а также наличием железорудных объектов (Талате, Абагонг, Вуласигу). Данные по месторождениям Монгольской части менее детальны, но в настоящее время известно крупное полиметаллическое месторождение с золотом – Дулаан кхар уул. Таким образом, несмотря на общую девонскую природу рудообразования в рамках Большого Алтая, каждый сегмент обладает специфическими чертами в типах месторождений, ведущих полезных компонентах и степени их геологической переработки.

Необходимо отметить, что достигнутые в последние годы результаты геологоразведочных работ не привели к коренному улучшению обстановки с сырьевой базой на Большом Алтае. В последние несколько десятков лет здесь не выявлено ни одного крупного месторождения. Однако Большой Алтай остаётся перспективным регионом для открытия новых VMS-месторождений благодаря благоприятной геологической позиции, наличию крупных месторождений, а также развитию технологий поисков и разведки. Ключевыми факторами успеха станут межгосударственные взаимодействия (совместные проекты стран Большого Алтая в обмене геологическими данными, инвестиции в ГРП). Открытия могут укрепить позиции региона как важного источника цветных, благородных и редких металлов.

Изучение месторождений типа VMS в пределах Большого Алтая имеет как теоретическое значение для понимания процессов рудообразования, так и практическое – для совершенствования методов поиска и оценки подобных объектов. Для более детального анализа условий их формирова-

ния необходимо проводить дальнейшее изучение. В частности, собрать и обобщить информацию по:

- геохронологическим и изотопным исследованиям;
- минералогии и микроанализу руд (LA-ICP-MS, SEM-EDS);
- другим VMS-провинциям (например, Салаирской и Улугуйской металлогеническим зонам, Иберийскому пиритовому поясу и Канадскому щиту).

Выводы.

1. Месторождения, выявленные в пределах Рудноалтайской металлогенической зоны, Китайского и Монгольского Алтая, локализуются в вулканогенно-осадочных и вулканогенных породах рудоносных формаций девонского возраста, которые соответствуют двум циклам вулканической активности в регионе. С северо-запада на юго-восток отмечается увеличение возраста рудовмещающих пород, Китайский Алтай является продолжением Рудноалтайской МЗ на юго-востоке.

2. Проанализированный комплекс петрохимических характеристик – биполярность состава, вариабельность щёлочности, особенности дифференциации магм и пространственное распределение геохимических типов – убедительно свидетельствует о формировании вулканогенных пород обеих формаций в условиях рифтогенеза. Эти данные хорошо согласуются с современными представлениями о геодинамической эволюции Большого Алтая в палеозое, когда регион переживал этап растяжения коры с формированием рифтогенных структур, контролировавших как магматизм, так и сопутствующее рудообразование.

3. Были выделены 11 рудных районов, проведён анализ запасов месторождений, продуктивности рудоносных формаций, а также выделены две рудные формации (свинцово-цинковая колчедансодержащая и медно-свинцово-цинковая колчеданная).

4. Отмечается чёткая приуроченность крупных и значимых месторождений к девонскому периоду (около 360–410 млн лет назад). Подавляющее большинство объектов, таких как Корбалихинское, Рубцовское, Риддер-Сокольное, Тишинское, Малеевское в российской/казахстанской части, Ашеле и Кекетале в Китае, Дулаан кхар уул в Монголии, сформировались именно в это время. Это указывает на мощный и синхронный эпизод рудообразования, связанный с интенсивным вулканизмом и тектонической активностью.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Беспяев Х. А.* Атлас месторождений полезных ископаемых Казахстана. – Алматы, 2004. – 141 с.
2. *Беспяев Х. А., Полянский Н. В., Ганженко Т. Д.* Геология и металлогения юго-западного Алтая (в пределах территории Казахстана и Китая). – Алматы : Гылым, 1997. – 288 с.
3. *Вейц Б. И.* О генетической связи полиметаллического оруденения Рудного Алтая с девонским вулканизмом // Изв. АН СССР. Сер. геол. – 1953. – № 7. – С. 105–115.
4. *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.
5. *Гаськов И. В.* Особенности развития колчеданных рудно-магматических систем в островодужных обстановках Рудного Алтая и Южного Урала // Литосфера. – 2015. – № 2. – С. 17–39.
6. *Горжевский Д. И., Чекваидзе В. Б., Исакович И. З.* Типы полиметаллических месторождений Рудного Алтая, их происхождение и методы поисков. – М. : Недра, 1977. – 197 с.
7. *Демина Л. И., Промышлова М. Ю.* Геодинамическая природа девонской рудоносной базальт-риолитовой формации Рудного Алтая // Тектоника и геофизика литосферы : Материалы XXXV тектонического совещания. – М. : ГЕОС, 2002. – Т. 1. – С. 163–166.
8. *Дергачев А. Л.* Эволюция вулканогенного колчеданообразования в истории Земли : специальность 25.00.11 «Геология, поиски и разведка твердых полезных ископаемых, минерагения» : автореф. дис. на соискание учёной степени д-ра геол.-минер. наук / Дергачев Александр Лукич. – М. : МГУ, 2010. – 262 с.
9. *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.
10. *Дьячков Б. А., Титов Д. В., Сапаргалиев Е. М.* Рудные пояса Большого Алтая и оценка их перспектив // Геология рудных месторождений. – 2009. – Т. 51, № 3. – С. 222–238.
11. *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.
12. *Калинин Ю. А., Ковалев К. Р., Сердюков А. Н., Гладков А. С., Сухоруков В. П., Наумов Е. А., Травин А. В., Семенова Д. В., Серебряков Е. В., Греку Е. Д.* Возрастные рубежи и металлогеническое прогнозирование золоторудных месторождений Акжал-Бок-Ашалинской рудной зоны (Алтайская аккреционно-коллизонная система) // Геодинамика и тектонофизика. – 2021. – Т. 12, № 2. – С. 392–408.
13. *Ковалев К. Р., Калинин Ю. А., Полюнов В. И., Кыдырбеков Е. Л., Борисенко А. С., Наумов Е. А., Нетесов М. И., Клименко А. Г., Колесникова М. К.* Суздальское золото-сульфидное месторождение в черносланцевых толщах Восточного Казахстана // Геология рудных месторождений. – 2012. – Т. 54, № 4. – С. 305–328.
14. *Кудрявцева Н. Г.* Ряды рудных формаций месторождений цветных и благородных металлов в различных геодинамических обстановках // Руды и металлы. – 2001. – № 6. – С. 44–52.
15. *Кудрявцева Н. Г., Кузнецов В. В., Галямов А. Л.* Структурно-формационное районирование российской части Рудного Алтая как основа средне-масштабных прогнозных построений // Руды и металлы. – 2011. – № 3–4. – С. 103–104.
16. *Кудрявцева Н. Г., Кузнецов В. В., Серавина Т. В.* Геодинамические обстановки формирования месторождений цветных и благородных металлов Большого Алтая // Отечественная геология. – 2022. – № 2. – С. 12–23.
17. *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.
18. *Кузнецов В. В., Кудрявцева Н. Г., Галямов А. Л., Кузнецова С. В., Серавина Т. В.* Геолого-генетические основы прогноза и поисков колчеданно-полиметаллических месторождений рудноалтайского типа // Отечественная геология. – 2014. – № 2. – С. 30–38.
19. *Кузнецов В. В., Кудрявцева Н. Г., Серавина Т. В.* Геологические формации и структурно-формационное районирование Российской части Рудного Алтая // Материалы V международной научной конференции «Корреляция алтаид и уралид: глубинное строение литосферы, стратиграфия, магматизм, метаморфизм, геодинамика и металлогения». – Новосибирск, 2020. – С. 52–54.
20. *Кузнецов В. В., Кудрявцева Н. Г., Серавина Т. В., Мурзин О. В., Корчагина Д. А., Кузнецова С. В., Милев С. А.* Основы прогноза и поисков колчеданно-полиметаллических месторождений Рудного Алтая. – М. : ЦНИГРИ, 2019. – 206 с.
21. *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.

22. Куйбида М. Л. Базальтовый вулканизм системы островная дуга–задуговой бассейн (Алтайская активная окраина) // Тихоокеанская геология. – 2019. – Т. 38, № 3. – С. 108–120.
23. Металлогенический кодекс России. – М. : Геокарт-ГЕОС, 2012. – 126 с.
24. Пугачева И. П., Филатов Е. И., Колдаева Т. Г. Девонская вулcano-плутоническая ассоциация Рудного Алтая (на примере Змеиногорского рудного района) // Изв. АН СССР. Сер. геол. – 1981. – № 11. – С. 45–54.
25. Ручкин Г. В., Конкин В. Д., Кузнецов В. В., Пугачева И. П. Параметрические геолого-поисковые модели колчеданно-полиметаллических месторождений. – М. : ЦНИГРИ, 1992. – 150 с.
26. Серавина Т. В. Геологическое строение и петрохимические особенности рудоносных вулканогенно-осадочных отложений Березовогорского рудного поля (Рудный Алтай) // Отечественная геология. – 2015. – № 4. – С. 3–8.
27. 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.
28. 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.
29. 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.
30. Склярёв Е. В. Интерпретация геохимических данных. – М. : Интернет Инжиниринг, 2001. – 288 с.
31. Филатова Л. К., Филатов Е. И. Внутреннее строение рудовмещающих кремнекислых вулканогенных образований (на примере девонских вулканитов Рудного Алтая) // Материалы XII научно-практической конференции «Научно-методические основы прогноза, поисков и оценки месторождений алмазов, благородных и цветных металлов». – М., 2023. – С. 490–491.
32. Чернышев И. В., Викентьев И. В., Чугаев А. В. Источники металлов колчеданных месторождений Рудного Алтая по данным высокоточного MC-ICP-MS изучения изотопного состава свинца // Геохимия. – 2023. – Т. 68, № 6. – С. 545–569.
33. Щерба Г. Н., Беспяев Х. А., Дьячков Б. А. [и др.] Большой Алтай (геология и металлогения). Кн. 2. Металлогения. – Алматы : РИО ВАК РК, 2000. – 400 с.
34. Broussolle A., Sun M., Schulmann K., Guy A., Aguilar C., Štípská P., Jiang Y. D., Yu Y., Xiao W. J. Are the Chinese Altai “terranes” the result of juxtaposition of different crustal levels during Late Devonian and Permian orogenesis? // Gondwana Res. – 2019. – 66. – P. 183–206.
35. Chekalin V. M., Dyachkov B. A. Rudny Altai base-metal belt: localization of massive sulfide mineralization // Geology of Ore Deposits. – 2013. – V. 55, № 6. – P. 438–454.
36. Dorjgotov D., Batdorj N., Tamir B. Distribution principles and characteristics of polymetal deposits of Mongolia // Mongolian Geoscientist journal. – 2011. – 37. – P. 167–179.
37. Dyachkov B. A., Bissatova A. Y., Mizernaya M. A., Khromykh S. V., Oitseva T. A., Kuzmina O. N., Zimanovskaya N. A., Aitbayeva S. S. Mineralogical Tracers of Gold and Rare-Metal Mineralization in Eastern Kazakhstan // Minerals. – 2021. – 11. – P. 253.
38. Dyachkov B. A., Mizernaya M. A., Khromykh S. V., Bissatova A. Y., Oitseva T. A., Miroshnikova A. P., Frolova O. V., Kuzmina O. N., Zimanovskaya N. A., Pyatkova A. P., Zikirova K., Ageyeva O. V., Yeskaliyev Y. T. Geological History of the Great Altai: Implications for Mineral Exploration // Minerals. – 2022. – 12(6). – P. 744.
39. Erdenebayar J., Ogata T., Byambajav A., Ukhnaa G., Baldorj B., Komine Y., Yamamoto M., Mizuta T. Geological and Geochemical study on Volcanogenic Massive Sulfide Deposits in Western Mongolia // Conference paper : GSA Annual Meeting in Denver, Colorado, USA. – 2016.
40. 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.
41. Galley A. G., Hannington M., Jonasson I. R. Volcanogenic massive sulphide deposits, in Goodfellow, W.D., ed., 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. 141–161.
42. Gao L. L., Chen C., Wang K. Y., Zhang X. B. 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. – P. 103641.
43. Geng X. X., Yang F. Q., Chai F. M., Liu M., Guo X. J., Guo Z. L., Liu F., Zhang Z. X. LA-ICP-MS U–Pb dating of volcanic rocks from Dadonggou ore district on southern margin of Altai in Xinjiang and its geological implications // Mineral Deposits. – 2012. – 031 (5). – P. 1119–1131.
44. Geng X. X., Yang F. Q., Yang J. M., Huang C. K., Liu F., Chai F. M., Zhang Z. X. Characteristics of fluid

- inclusions in the Tiemurte Pb-Zn deposit, Altay, Xinjiang and its geological significance // *Acta Petrol. Sin.* – 2010. – 26 (03). – P. 695–706.
45. Gerel O., Pirajno F., Batkhisig B., Dostal J. Mineral Resources of Mongolia. – Singapore, Springer Nature Pte Ltd., 2021. – 461 p.
 46. Ivanov A. I., Naumov E. A., Kulikov D. A., Girfanov M. M., Seravina T. V., Fomina M. I. Contribution of FSBI «TSNIGRI» to the international cooperation of ROSNEDRA with the BRICS countries in the field of the geology and mineral resource study // *Разведка и охрана недр.* – 2024. – SPECIAL ISSUE. – С. 53–66.
 47. Kuibida M. L., Murzin O. V., Kruk N. N., Safonova I. Y., Sun M., Komiya T., Wong D., Aoki S., Murzina N. M., Nikolaeva I., Semenova D. V., Khlestov M., Shelepaev R. A., Kotler P. D., Yakovlev V. A., Naryzhnova A. V. Whole-rock geochemistry and U-Pb ages of Devonian bimodal-type rhyolites from the Rudny Altai, Russia: Petrogenesis and tectonic settings // *Gondwana Res.* – 2020. – V. 81. – P. 312–338.
 48. Large R. R. Australian volcanic-hosted massive sulfide deposits – features, styles, and genetic models // *Economic Geology.* – 1992. – V. 87. – P. 471–510.
 49. Li Q., Chai F. M., Yang F. Q., Yang J. J. Petrogenesis of the Kuwei Ni-Cu sulfide and Fe-Ti oxide-bearing mafic-ultramafic intrusions in Altay, Xinjiang, NW China // *Acta Petrol. Sin.* – 2015. – 31 (8). – P. 2211–2229.
 50. Liu F., Zhang Z. X., Li Q., Zhang C., Li C. New precise timing constraint for the Keketuohai No. 3 pegmatite in Xinjiang, China, and identification of its parental pluton // *Ore Geol. Rev.* – 2014. – 6. – P. 209–219.
 51. 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. – P. 103814.
 52. Piercey S. J. A semipermeable interface model for the genesis of subseafloor replacement type volcanogenic massive sulfide (VMS) deposits // *Economic Geology.* – 2015. – V. 110. – P. 1655–1660.
 53. Pirajno F., Seltmann R., Yang Y. A review of mineral systems and associated tectonic settings of northern Xinjiang, NW China // *Geosci. Front.* – 2011. – 2 (2). – P. 157–185.
 54. Seltmann R., Porter T. M., Pirajno F. Geodynamics and metallogeny of the central Eurasian porphyry and related epithermal mineral systems: A review // *J. Asian Earth Sci.* – 2014. – 79. – P. 810–841.
 55. 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.
 56. Sun C., Zhang H., Yang X., Ji W., Chen B., Li Y., Dong Z., 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. – V. 118. – P. 194–217.
 57. Tamir B., Dorjgotov D., Lkhagvatseren B. Geology and ore composition studies of Dulaan khar uul polymetal deposit // *Journal of Geological Issues.* – 2018. – (494) (16). – P. 76–83.
 58. 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.
 59. Xiao W., Pirajno F., Seltmann R., Safonova I., Chen Y., Muhtar M. N. Metallogeny of the Southern Altaids: Key to understanding the accretionary tectonics and crustal evolution of Central Asia // *Ore Geol. Rev.* – 2022. – 144. – P. 104871.
 60. Xu J., Zhang H., Lin L., Xiao X., Bian C. Geochronology and origin of the Sarekoubu gold deposit, southern Altaides, China: Ar-Ar dating of vein quartz and Cu-Zn-Fe isotopes // *Ore Geol. Rev.* – 2020. – 124. – P. 103642.
 61. Xu L. G., Mao J. W., Yang F. Q., Daniel H., Zheng J. M. Geology, geochemistry and age constraints on the Mengku skarn iron deposit in Xinjiang Altai, NW China // *J. Asian Earth Sci.* – 2010. – 39. – P. 423–440.
 62. Yakubchuk A. S., Shatov V. V., Kirwin D., Tomurtoogoo O., Badarch G., Buryak A. A. Gold and base metal metallogeny of the Central Asian Orogenic supercolage // *Econ. Geol.* – 2005. – 100th Anniversary Issue. – P. 1035–1068.
 63. Yang C. D., He J. X., Yang F. Q., Wu Y. F., Li Q. Petrogenesis and geodynamic significance of Kayinde gabbro in the Ashele Basin, Altay Orogenic Belt, Xinjiang, Northwest China: Constraints from geochronological and geochemical data // *Geological Journal.* – 2020. – 55. – P. 1849–1865.
 64. 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. – P. 222.
 65. 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 // *Journal of Asian Earth Sciences.* – 2018. – 159. – P. 233–258.
 66. 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.

67. Yang F. Q., Zhang B., Yang C. D., Li Q., Wang Y. Q. Geology and geochronology of the volcanogenic massive sulphide polymetallic deposits in Altay Orogenic Belt, Xinjiang, Northwest China: examples from the Kelan Basin // *Int. Geol. Rev.* – 2020. – 63 (10). – P. 1199–1214.
68. 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. – 144.
69. 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 Geology Reviews.* – 2024. – V. 167. – P. 105977.
70. 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 Tiemurt in Chinese Altay Orogen, NW China // *Gondwana Res.* – 2019. – 72. – P. 65–82.
71. Yu P., Zheng Y., Wang C. M. Trace elemental and sulfur-lead isotopic variations in metamorphosed volcanogenic massive sulfide (VMS) mineralization systems: An example from the Keketale Pb-Zn(-Ag) deposit, NW China // *Ore Geol. Rev.* – 2020. – 125. – P. 103685.

REFERENCES

1. *Bespayev Kh. A. Atlas mestorozhdeniy poleznykh iskopayemykh Kazakhstana [Atlas of mineral deposits of Kazakhstan]*, Almaty, 2004, 141 p. (In Russ.)
2. *Bespayev Kh. A., Polyanskiy N. V., Ganzhenko T. D. Geologiya i metallogeniya yugo-zapadnogo Altaya (v predelakh territorii Kazakhstana i Kitaya) [Geology and metallogeny of the southwestern Altai (within the territory of Kazakhstan and China)]*, Almaty, Gylym publ., 1997, 288 p. (In Russ.)
3. *Veyts B. I. O geneticheskoy svyazi polimetallicheskogo orudneniya 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.)
4. *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.)
5. *Gaskov I. V. Osobennosti razvitiya kolchedannykh rudno-magmaticheskikh sistem v ostrovoduzhnykh obstanovkakh Rudnogo Altaya i Yuzhnogo Urala [Features of the development of pyrite ore-magmatic systems in island-arc environments of Rudny Altai and the Southern Urals]*, *Litosfera*, 2015, No. 2, pp. 17–39. (In Russ.)
6. *Gorzhevskiy D. I., Chekvaidze V. B., Isakovich I. Z. Tipy polimetallicheskikh 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.)
7. *Demina L. I., Promyslova M. Yu. Geodinamicheskaya priroda devonskoy rudonosnoy bazalt-riolitovoy formatsii Rudnogo Altaya [Geodynamic nature of the Devonian ore-bearing basalt-rhyolite formation of Rudny Altai]*, *Tektonika i geofizika litosfery, Materialy XXXV tektonicheskogo soveshchaniya*, Moscow, GEOS publ., 2002, V. 1, pp. 163–166. (In Russ.)
8. *Dergachev A. L. Evolyutsiya vulkanogenno kolchedannoobrazovaniya v istorii Zemli [Evolution of volcanogenic pyrite formation in the history of the Earth]*, *Dergachev Aleksandr Lukich*, Moscow, MGU publ., 2010, 262 p. (In Russ.)
9. *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-polimetallicheskikh 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.)
10. *Dyachkov B. A., Titov D. V., Sapargaliyev Ye. M. Rudnyye poyasa Bolshogo Altaya i otsenka ikh perspektiv [Ore belts of the Greater Altai and assessment of their prospects]*, *Geologiya rudnykh mestorozhdeniy*, 2009, V. 51, No. 3, pp. 222–238. (In Russ.)
11. *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.)
12. *Kalinin Yu. A., Kovalev K. R., Serdyukov A. N., Gladkov A. S., Sukhorukov V. P., Naumov Ye. A., Travin A. V., Se-menova D. V., Serebryakov Ye. V., Greku Ye. D. Vozrast-nyye rubezhi i metallogenicheskoye prognozirovaniye zolotorudnykh mestorozhdeniy Akzhal-Boko-Ashalinskoy rudnoy zony (Altayskaya akkretsiionno-kolli-zionnaya sistema) [Age boundaries and metallogenic forecasting of gold ore deposits of the Akzhal-Boko-Ashalinskaya ore zone (Altai accretion-collision system)]*, *Geodinamika i tektonofizika*, 2021, V. 12, No. 2, pp. 392–408. (In Russ.)
13. *Kovalev K. R., Kalinin Yu. A., Polynov V. I., Kydyrbekov E. L., Borisenko A. S., Naumov E. A., Netesov M. I., Klimenko A. G., Kolesnikova M. K. Suzdalskoye zolot-*

- to-sulfidnoye mestorozhdeniye v chernoslantsevyykh tolshchakh Vostochnogo Kazakhstana [Suzdal gold-sulfide deposit in black shale strata of Eastern Kazakhstan], *Geologiya rudnykh mestorozhdeniy*, 2012, V. 54, No. 4, pp. 305–328. (In Russ.)
14. *Kudryavtseva N. G.* Ryady rudnykh formatsiy mestorozhdeniy tsvetnykh i blagorodnykh metallov v razlichnykh geodinamicheskikh obstanovkakh [Series of ore formations of deposits of non-ferrous and precious metals in various geodynamic settings], *Rudy i metally*, 2001, No.6, pp. 44–52. (In Russ.)
 15. *Kudryavtseva N. G., Kuznetsov V. V., Galyamov A. L.* Strukturno-formatsionnoye rayonirovaniye rossiyskoy chasti Rudnogo Altaya kak osnova srednemasshtabnykh prognoznykh postroyeniy [Structural-formational zoning of the Russian part of Rudny Altai as a basis for medium-scale forecast constructions], *Rudy i metally*, 2011, No. 3–4, pp. 103–104. (In Russ.)
 16. *Kudryavtseva N. G., Kuznetsov V. V., Seravina T. V.* Geodinamicheskiye obstanovki formirovaniya mestorozhdeniy tsvetnykh i blagorodnykh metallov Bolshogo Altaya [Geodynamic settings for the formation of deposits of non-ferrous and precious metals in the Greater Altai], *Otechestvennaya geologiya*, 2022, No. 2, pp. 12–23. (In Russ.)
 17. *Kudryavtseva N. G., Kuznetsov V. V., Seravina T. V., Ivanenkova Ye. V.* Strukturno-formatsionnoye i metallogenicheskoye rayonirovaniye Bolshogo Altaya [Structural-formational and metallogenetic zoning of the Greater Altai], *Otechestvennaya geologiya*, 2025, No. 2, pp. 50–60. (In Russ.)
 18. *Kuznetsov V. V., Kudryavtseva N. G., Galyamov A. L., Kuznetsova S. V., Seravina T. V.* Geologo-geneticheskiye osnovy prognoza i poiskov kolchedanno-polimetallicheskih mestorozhdeniy rudnoaltayskogo tipa [Geological and genetic foundations of forecasting and prospecting for pyrite-polymetallic deposits of the Ore-Altai type], *Otechestvennaya geologiya*, 2014, No. 2, pp. 30–38. (In Russ.)
 19. *Kuznetsov V. V., Kudryavtseva N. G., Seravina T. V.* Geologicheskkiye formatsii i strukturno-formatsionnoye rayonirovaniye Rossiyskoy chasti Rudnogo Altaya [Geological formations and structural-formational zoning of the Russian part of Rudny Altai], *Novosibirsk*, 2020, pp. 52–54. (In Russ.)
 20. *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, TSNIGRI publ., 2019, 206 p. (In Russ.)
 21. *Kuznetsova S. V., Seravina T. V.* Usloviya lokalizatsii, osobennosti veshchestvennogo sostava rud i stroyeniye sulfidnogo 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 neдр*, 2020, No. 1, pp. 19–30. (In Russ.)
 22. *Kuybida M. L.* Bazaltovyy vulkanizm sistemy ostrovnaya duga-zadugovyy basseyn (Altayskaya aktivnaya okraina) [Basaltic volcanism of the island arc-back-arc basin system (Altai active margin)], *Tikhookeanskaya geologiya*, 2019, V. 38, No. 3, pp. 108–120. (In Russ.)
 23. *Metallogenicheskiy kodeks Rossii* [Metallogenetic Code of Russia], Moscow, Geokart-GEOS publ., 2012, 126 p. (In Russ.)
 24. *Pugacheva I. P., Filatov Ye. I., Koldayeva T. G.* Devonская вулкано-плутоническая ассоциация Rudnogo Altaya (na primere Zmeinogorskogo rudnogo rayona) [Devonian volcanic-plutonic association of Rudny Altai (on the example of the Zmeinogorsk ore district)], *Izv. AN SSSR. Ser. geol.*, 1981, No. 11, pp. 45–54. (In Russ.)
 25. *Ruchkin G. V., Konkin V. D., Kuznetsov V. V., Pugacheva I. P.* Parametricheskkiye geologo-poiskovyye modeli kolchedanno-polimetallicheskih mestorozhdeniy [Parametric geological exploration models of pyrite-polymetallic deposits], Moscow, TSNIGRI publ., 1992, 150 p. (In Russ.)
 26. *Seravina T. V.* Geologicheskoye stroyeniye i petrokhimicheskiye osobennosti rudonosnykh vulkanogenno-osadochnykh otlozheniy Berezovogorskogo rudnogo polya (Rudnyy Altay) [Geological structure and petrochemical features of ore-bearing volcanogenic-sedimentary deposits of the Berezovogorsk ore field (Rudny Altai)], *Otechestvennaya geologiya*, 2015, No. 4, pp. 3–8. (In Russ.)
 27. *Seravina T. V., Kuznetsov V. V., Kuznetsova S. V., Filatova L. K., Ivanenkova Ye. V.* Kolchedanno-polimetallicheskoye 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.)
 28. *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.)
 29. *Seravina T. V., Kuznetsova S. V., Filatova L. K., Donets A. I., Konkin V. D.* Osobennosti lokalizatsii kolchedanno-polimetallicheskih rud Tushkanikhinskogo

- mestorozhdeniya (Rudnyy Altay) [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.)
30. *Sklyarov Ye. V.* Interpretatsiya geokhimicheskikh danykh [Interpretation of geochemical data], Moscow, Intermet Inzhiniring publ., 2001, 288 p. (In Russ.)
 31. *Filatova L. K., Filatov Ye. I.* Vnutrenneye stroyeniye rudovmeshchayushchikh kremnekislykh vulkanogennykh obrazovaniy (na primere devonskikh vulkanitov Rudnogo Altaya) [Internal structure of ore-bearing siliceous volcanic formations (using the Devonian volcanics of Rudny Altai as an example)], Moscow, 2023, pp. 490–491. (In Russ.)
 32. *Chernyshev I. V., Vikentyev I. V., Chugayev A. V.* Istochniki metallov kolchedannykh mestorozhdeniy Rudnogo Altaya po dannym vysokotochnogo MC-ICP-MS izucheniya izotopnogo sostava svintsya [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.)
 33. *Shcherba G. N., Bespaev Kh. A., Dyachkov B. A.* [et al.] Bolshoy 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.)
 34. *Broussolle A., Sun M., Schulmann K., Guy A., Aguilar C., Štípská P., Jiang Y. D., Yu Y., Xiao W. J.* Are the Chinese Altai “terrane” the result of juxtaposition of different crustal levels during Late Devonian and Permian orogenesis?, *Gondwana Res*, 2019, 66, pp. 183–206.
 35. *Chekalin V. M., Dyachkov B. A.* Rudny Altai base-metal belt: localization of massive sulfide mineralization, *Geology of Ore Deposits*, 2013, V. 55, No. 6, pp. 438–454.
 36. *Dorjgotov D., Batdorj N., Tamir B.* Distribution principles and characteristics of polymetal deposits of Mongolia, *Mongolian Geoscientist journal*, 2011, 37, pp. 167–179.
 37. *Dyachkov B. A., Bissatova A. Y., Mizernaya M. A., Khromykh S. V., Oitseva T. A., Kuzmina O. N., Zimanovskaya N. A., Aitbayeva S. S.* Mineralogical Tracers of Gold and Rare-Metal Mineralization in Eastern Kazakhstan, *Minerals*, 2021, 11, pp. 253.
 38. *Dyachkov B. A.; Mizernaya M. A., Khromykh S. V., Bissatova A. Y., Oitseva T. A., Miroshnikova A. P., Frolova O. V., Kuzmina O. N., Zimanovskaya N. A., Pyatkova A. P., Zikirova K., Ageyeva O. V., Yeskaliyev Y. T.* Geological History of the Great Altai: Implications for Mineral Exploration, *Minerals*, 2022, 12(6), pp. 744.
 39. *Erdenebayar J., Ogata T., Byambajav A., Ukhnaa G., Baldorj B., Komine Y., Yamamoto M., Mizuta T.* Geological and Geochemical study on Volcanogenic Massive Sulfide Deposits in Western Mongolia, Conference paper: GSA Annual Meeting in Denver, Colorado, USA, 2016.
 40. *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.
 41. *Galley A. G., Hannington M., Jonasson I. R.* Volcanogenic massive sulphide deposits, in Goodfellow, W.D., ed., *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. 141–161.
 42. *Gao L. L., Chen C., Wang K. Y., Zhang X. B.* 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, pp. 103641.
 43. *Geng X. X., Yang F. Q., Chai F. M., Liu, M., Guo X. J., Guo Z. L., Liu F., Zhang Z. X.* LA-ICP-MS U–Pb dating of volcanic rocks from Dadonggou ore district on southern margin of Altay in Xinjiang and its geological implications, *Mineral Deposits*, 2012, 031 (5), pp. 1119–1131.
 44. *Geng X. X., Yang F. Q., Yang J. M., Huang C. K., Liu F., Chai F. M., Zhang Z. X.* Characteristics of fluid inclusions in the Tiemurte Pb–Zn deposit, Altay, Xinjiang and its geological significance, *Acta Petrol. Sin*, 2010, 26 (03), pp. 695–706.
 45. *Gerel O., Pirajno F., Batkhishig B., Dostal J.* Mineral Resources of Mongolia, Singapore : Springer Nature Pte Ltd., 2021, 461 p.
 46. *Ivanov A. I., Naumov E. A., Kulikov D. A., Girfanov M. M., Seravina T. V., Fomina M. I.* Contribution of FSBI «TSNIGRI» to the international cooperation of ROSNEDRA with the BRICS countries in the field of the geology and mineral resource study, *Razvedka i okhrana nedr*, 2024, SPECIAL ISSUE, pp. 53–66.
 47. *Kuibida M. L., Murzin O. V., Kruk N. N., Safonova I. Y., Sun M., Komiya T., Wong D., Aoki S., Murzina N. M., Nikolaeva I., Semenova D. V., Khlestov M., Shelepaev R. A., Kotler P. D., Yakovlev V. A., Naryzhnova A. V.* Whole-rock geochemistry and U–Pb ages of Devonian bimodal-type rhyolites from the Rudny Altai, Russia: Petrogenesis and tectonic settings, *Gondwana Res*, 2020, V. 81, pp. 312–338.
 48. *Large R. R.* Australian volcanic-hosted massive sulfide deposits — features, styles, and genetic models, *Economic Geology*, 1992, V. 87, pp. 471–510.
 49. *Li Q., Chai F. M., Yang F. Q., Yang J. J.* Petrogenesis of the Kuwei Ni–Cu sulfide and Fe–Ti oxide-bearing mafic-ultramafic intrusions in Altay, Xinjiang, NW China, *Acta Petrol. Sin*, 2015, 31 (8), pp. 2211–2229.
 50. *Liu F., Zhang Z. X., Li Q., Zhang C., Li C.* New precise timing constraint for the Keketuohai No. 3 peg-

- matite in Xinjiang, China, and identification of its parental pluton, *Ore Geol. Rev.*, 2014, 6, pp. 209–219.
51. *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, pp. 103814.
 52. *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.
 53. *Pirajno F., Seltmann R., Yang Y.* A review of mineral systems and associated tectonic settings of northern Xinjiang, NW China, *Geosci. Front.*, 2011, 2 (2), pp. 157–185.
 54. *Seltmann R., Porter T. M., Pirajno F.* Geodynamics and metallogeny of the central Eurasian porphyry and related epithermal mineral systems: A review, *J. Asian Earth Sci.*, 2014, 79, pp. 810–841.
 55. *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.
 56. *Sun C., Zhang H., Yang X., Ji W., Chen B., Li Y., Dong Z., 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, V. 118, pp. 194–217.
 57. *Tamir B., Dorjgotov D., Lkhagvatseren B.* Geology and ore composition studies of Dulaan khar uul polymetal deposit, *Journal of Geological Issues*, 2018, (494) (16), pp. 76–83.
 58. *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.
 59. *Xiao W., Pirajno F., Seltmann R., Safonova I., Chen Y., Muhtar M. N.* Metallogeny of the Southern Altaids: Key to understanding the accretionary tectonics and crustal evolution of Central Asia, *Ore Geol. Rev.*, 2022, 144, pp. 104871.
 60. *Xu J., Zhang H., Lin L., Xiao X., Bian C.* Geochronology and origin of the Sarekoubu gold deposit, southern Altaids, China: Ar-Ar dating of vein quartz and Cu-Zn-Fe isotopes, *Ore Geol. Rev.*, 2020, 124, pp. 103642.
 61. *Xu L. G., Mao J. W., Yang F. Q., Daniel H., Zheng J. M.* Geology, geochemistry and age constraints on the Mengku skarn iron deposit in Xinjiang Altai, NW China, *J. Asian Earth Sci.*, 2010, 39, pp. 423–440.
 62. *Yakubchuk A. S., Shatov V. V., Kirwin D., Tomurtoogoo O., Badarch G., Buryak A. A.* Gold and base metal metallogeny of the Central Asian Orogenic supercollage, *Econ. Geol.*, 2005, 100th Anniversary Issue, pp. 1035–1068.
 63. *Yang C. D., He J. X., Yang F. Q., Wu Y. F., Li Q.* Petrogenesis and geodynamic significance of Kayinde gabbro in the Ashele Basin, Altay Orogenic Belt, Xinjiang, Northwest China: Constraints from geochronological and geochemical data, *Geological Journal*, 2020, 55, pp. 1849–1865.
 64. *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, p. 222.
 65. *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, *Journal of Asian Earth Sciences*, 2018, 159, pp. 233–258.
 66. *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.
 67. *Yang F. Q., Zhang B., Yang C. D., Li Q., Wang Y. Q.* Geology and geochronology of the volcanogenic massive sulphide polymetallic deposits in Altay Orogenic Belt, Xinjiang, Northwest China: examples from the Kelan Basin, *Int. Geol. Rev.*, 2020, 63 (10), pp. 1199–1214.
 68. *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, 144.
 69. *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 Geology Reviews*, 2024, V. 167, pp. 105977.
 70. *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.
 71. *Yu P., Zheng Y., Wang C. M.* Trace elemental and sulfur-lead isotopic variations in metamorphosed volcanogenic massive sulfide (VMS) mineralization systems: An example from the Keketale Pb-Zn(-Ag) deposit, NW China, *Ore Geol. Rev.*, 2020, 125, pp. 103685.

Статья поступила в редакцию 25.09.25; одобрена после рецензирования 20.10.25; принята к публикации 03.12.25.
The article was submitted 25.09.25; approved after reviewing 20.10.25; accepted for publication 03.12.25.