

Месторождения типа VMS Алтае-Саянской металлогенической провинции (Рудноалтайская, Салаирская и Улугойская зоны), Иберийского пиритового пояса (Испания, Португалия), а также района Батерст (Канада): сравнительная характеристика

Аннотация. В работе проведён сравнительный анализ колчеданно-полиметаллических месторождений типа VMS Алтае-Саянской металлогенической провинции (Рудноалтайская, Салаирская, Улугойская зоны) с эталонными провинциями мира – Иберийским пиритовым поясом (Испания, Португалия) и рудным районом Батерст (Канада). Рассмотрены геологическое строение, литолого-фациальные особенности, минеральные типы руд, структурно-вещественные условия локализации оруденения, а также изотопный состав серы. Установлены универсальные черты VMS-рудобразования: приуроченность к бимодальным вулканогенно-осадочным комплексам рифтогенного типа, доминирование пирита, сфалерита, галенита и халькопирита, зональность от медно-колчеданных к цинково-свинцовым рудам. Выявлены региональные различия, главным образом по изотопному составу серы, отражающие разные палеообстановки (гидротермальное восстановление сульфата, бактериальная сульфатредукция в открытых или изолированных бассейнах). Результаты могут быть использованы при металлогеническом прогнозировании и поисках новых объектов типа VMS.

Ключевые слова: VMS, Алтае-Саянская металлогеническая провинция, Иберийский пиритовый пояс, район Батерст, изотопный состав серы.

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

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

The VMS type deposits of the Altai-Sayany metallogenic province (including the Rudnyi Altai, Salair, and Ulugoi zones), the Iberian Pyrite Belt in Spain and Portugal, and the Bathurst Mining Camp in Canada: The comparative characteristics

T. V. SERAVINA

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

Abstract. The paper presents a comparative analysis of VMS-type massive sulfide polymetallic deposits of the Altai-Sayany metallogenic province (including the Rudnyi Altai, Salair, and Ulugoi zones) with the world's reference provinces, the Iberian Pyrite Belt in Spain and Portugal and the Bathurst Mining Camp in Canada. The geological structure, lithofacies characteristics, mineral types, structural and compositional localization conditions, and sulfur isotope composition of the mineralization are considered. Established universal features of the VMS ore formation comprise the confinement to bimodal volcanosedimentary complexes of the riftogenic type; predominance of pyrite, sphalerite, galena, and chalcopyrite; and zonal transition from copper-pyrite to zinc-lead ores. Regional differences identified, mainly in the sulfur isotope composition, reflect different paleoenvironments of the ore formation (hydrothermal sulfate reduction, bacterial sulfate reduction in open or isolated basins). The results are applicable to the metallogenic forecasting and exploration of new VMS-type objects.

Key words: VMS, Altai-Sayany metallogenic province, Iberian Pyrite Belt, Bathurst Mining Camp, sulfur isotopic composition.

Введение. Колчеданно-полиметаллические месторождения типа VMS (volcanogenic massive sulfide) являются одним из главных источников

меди, цинка, свинца, золота и серебра в мире. Их формирование неразрывно связано с эволюцией палеоокеанических бассейнов, субмаринным

вулканизмом и сопутствующей гидротермальной деятельностью в обстановках растяжения и рифтогенеза. Локализация рудных тел контролируется сочетанием магматических и структурных факторов. Ключевую роль играют синвулканические разломы, зоны растяжения и вулканотектонические депрессии. Субвулканические интрузии на глубинах от двух до пяти километров служат основным источником тепла, обеспечивающим длительную конвекцию и взаимодействие морской воды с породами фундамента. Морфология рудных залежей варьирует от холмообразных построек до пластообразных тел, причём последнее нередко формируются в придонных бассейнах. В подводных каналах рудоносных гидротерм развиваются зоны окварцевания и хлоритизации, сменяющиеся серицитовыми и пропиловыми ассоциациями.

Сравнительный анализ различных металлогенических провинций и зон, вмещающих подобное оруденение, позволяет выявить как универсальные закономерности рудообразования, так и региональные особенности, обусловленные спецификой геодинамического развития, составом рудовмещающих комплексов и структурным контролем. Такие исследования имеют как фундаментальное значение для понимания рудообразующих систем, так и практическую ценность для прогнозирования и поисков новых объектов.

В настоящей работе рассмотрены ключевые характеристики колчеданно-полиметаллических объектов Алтае-Саянской провинции (Рудноалтайская, Салаирская и Улугойская металлогенические зоны), а также эталонных мировых провинций – Иберийского пиритового пояса (Испания, Португалия) и рудного района Батерст (Канада) (рис. 1).

В пределах Алтае-Саянской складчатой области (металлогенической провинции) сосредоточены многочисленные месторождения благородных, цветных и редких металлов, а также нерудных ископаемых. Однако внутреннее строение провинции, её металлогеническая зональность и геохимические особенности остаются предметом дискуссий. Для выявления общих закономерностей размещения и генезиса колчеданно-полиметаллического оруденения целесообразно сопоставить объекты Рудноалтайской, Салаирской и Улугойской металлогенической зон Алтае-Саянской провинции с двумя другими крупнейшими VMS-провинциями мира – Иберийским пиритовым поя-

сом (ИПП) и рудным районом Батерст (Канада). Сравнение геологического строения, палеоструктурных обстановок, минерального состава и изотопно-геохимических характеристик руд позволяет проследить как универсальные черты VMS-рудообразования, так и специфику, обусловленную региональными особенностями эволюции палеобассейнов. Цели настоящей работы – на основе комплексного анализа выделить главные типы рудоконтролирующих структур, охарактеризовать минеральные ассоциации, изотопные составы серы в рудах и исходя из этого сравнить вышеперечисленные провинции, в которых выявлены месторождения типа VMS.

Для достижения поставленной цели решены следующие задачи: проанализировано геологическое строение и литолого-фациальные особенности рудовмещающих толщ исследуемых районов; выявлены основные структурно-вещественные обстановки локализации колчеданно-полиметаллического оруденения; проведено сопоставление минеральных типов руд и изотопно-геохимических характеристик серы, а также определены сходства и различия в составе вмещающих пород, условиях рудоотложения и источниках серы.

Общие сведения. Алтае-Саянская складчатая область (металлогеническая провинция) охватывает юго-западное обрамление Сибирской платформы и представляет собой западный фрагмент Алтае-Монголо-Охотского сегмента рифейско-палеозойского Центрально-Азиатского складчатого пояса (ЦАСП) [7, 56]. Провинция локализована в области сочленения субмеридиональных (Уральских) и субширотных (Монголо-Охотских) структурных направлений. На северо-востоке она граничит по Главному Восточно-Саянскому разлому с Енисейско-Саянской областью, а на юго-западе по Восточно-Чингизскому разлому отделяется от палеозойских структур Казахского нагорья. Юго-восточное продолжение провинции прослеживается на территории Монголии и Северного Китая, тогда как на северо-западе её структуры погружаются под мезозойско-кайнозойский осадочный чехол Западно-Сибирской плиты. В соответствии с современными представлениями, Алтае-Саянская металлогеническая провинция является сложно построенной рифейско-палеозойской аккреционно-коллизонной системой, включающей многочисленные террейны (микроконтиненты, фрагменты островных дуг и океанических поднятий), сформировавшиеся в

ходе эволюции Палеоазиатского океана [7, 56]. В пределах провинции сосредоточено значительное количество месторождений благородных (золото), цветных (медь, свинец, цинк, никель, алюминий) и редких (тантал, ниобий, литий, бериллий) металлов, а также нерудных полезных ископаемых (бокситы, фосфориты, апатит, барит, тальк, магнетит, мусковит). Колчеданно-полиметаллические месторождения типа VMS локализованы в Рудноалтайской, Салаирской и Улугуйской металлогенических зонах. К числу наиболее значительных объектов относятся: Риддер-Сокольное, Тишинское, Малеевское, Орловское, Ново-Ленинское, Зыряновское, Чекмарь, Николаевское, Белоусовское (Республика Казахстан); Корбалихинское, Золотушинское, Кызыл-Таштыгское, Салаирское (Российская Федерация); Кекетале, Ашеле (Китайская Народная Республика), а также Дулаан кхар уул и Хох Адар (Монголия).

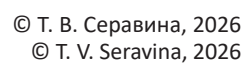
Для выявления общих закономерностей размещения и генезиса колчеданно-полиметаллического оруденения Алтае-Саянской провинции целесообразно сопоставить её с другими крупнейшими VMS-провинциями мира. К их числу относятся Иберийский пиритовый пояс (ИПП), расположенный на юго-западе Пиренейского полуострова и дугообразно простирающийся на 250 км при ширине от 25 до 70 км, и рудный район Батерст в провинции Нью-Брансуик (Канада). ИПП характеризуется колоссальными, не имеющими мировых аналогов масштабами оруденения: более восьмидесяти месторождений, в том числе гигантские Рио-Тинто, Невес-Корво, Тарсис и Ла-Сарса [45, 50]. Рудный район Батерст, в свою очередь, вмещает крупнейшие в мире колчеданно-полиметаллические объекты, среди которых эталонными являются месторождения Брансуик № 12 и № 6 [38, 39].

Рудовмещающие отложения и обстановки формирования. Рудноалтайская металлогеническая зона (Россия, Казахстан, Китай, Монголия). Месторождения Рудноалтайской металлогенической зоны (МЗ) образовались на рифтогенном этапе эволюции земной коры и ассоциированы с девонскими вулканогенно-осадочными комплексами. По составу, возрасту и соотношению вулканогенной и осадочной составляющих эти комплексы подразделяются на две формации, соответствующие двум циклам вулканической активности: нижнюю ($D_1lx-pr-D_2gv_1$) – последовательно дифференцированную базальтосодержа-

щую андезит-дацит-риолитовую известково-кремнисто-терригенную и верхнюю ($D_1c-D_3f_1$) – контрастную базальт-риолитовую кремнисто-терригенную [26].

Палеоструктуры рудных районов (Змеиногорского, Золотушинского, Рубцовского, Ленинского, Прииртышского, Зыряновского, Ашеле, Келан, Майзи, Хох Адар и Дулаан кхар уул) представляли собой вулканотектонические депрессии, осложнённые локальными структурами второго порядка. Данное положение подтверждается результатами вибросейсмических исследований, проведённых в 2010–2011 гг. в российской части зоны (рис. 2, А) [19]. Важную роль в рудообразовании играли субвулканические интрузии кислого, реже основного состава, служившие тепловыми источниками для гидротермальных конвективных систем (см. рис. 2, Б). Размещение колчеданно-полиметаллических залежей контролировалось зонами глубинных разломов, которые служили подводящими каналами для рудоносных растворов, тогда как экранирующую функцию выполняли прослои карбонатных и туфогенно-осадочных пород.

Анализ литологического состава рудных районов, вмещающих колчеданно-полиметаллические месторождения Рудноалтайской металлогенической зоны, позволяет выявить как общие закономерности, так и региональные различия в составе рудовмещающих толщ. В первую очередь, следует отметить, что все рассмотренные рудные районы характеризуются приуроченностью оруденения к вулканогенно-осадочным комплексам. Общей чертой разрезов является широкое развитие фаций кислого вулканизма, представленных риолитами, дацитами и их пирокластическими производными (автомагматические брекчии, лавобрекчии, туфы крупно-, средне- и мелкообломочные, включая смешанные разновидности), которые в большинстве районов переслаиваются с породами основного и среднего состава (лавы и туфы базальтов, андезитов и андезибазальтов). Не менее значимую роль в строении рудных районов играет вулканогенно-осадочная составляющая, представленная туффитами, туфопесчаниками, туфоалевролитами, а также горизонтами переслаивания терригенных пород с туфогенным материалом. Рудные тела закономерно тяготеют к определённым стратиграфическим уровням, маркированным подрудными и надрудными горизонтами, а также приурочены к пачкам с повы-



шенным содержанием углистого и кремнистого вещества, представленным углистыми аргиллитами, алевролитами и кремнистыми сланцами, что является ключевым поисковым признаком.

Вместе с тем литолого-фациальные обстановки формирования рудных залежей имеют существенные отличия. Так, для некоторых рудных районов (в первую очередь, Рубцовского, Змеиногорского и Золотушинского в РФ, а также Прииртышского в РК) характерно доминирование в разрезе собственно вулканических пород, где объёмы кислых и основных эффузивов сопоставимы с мощностью осадочных прослоев, при этом разрез отличается латеральной неоднородностью и частой сменой фаций. Отличительной особенностью Змеиногорского района выступает наличие мощной пачки основных вулканитов (лав и лавобрекчий базальтов) в кровле разреза, которая сменяется вниз по стратиграфической колонке серией переслаивающихся кислых эффузивов и терригенных пород; при этом, в отличие от месторождений КНР, интрузивные гранитоидные тела в данном разрезе не фиксируются. В отличие от российских районов, Лениногорский и Зырянский районы Казахстана демонстрируют заметное преобладание вулканогенно-осадочных и терригенных образований, где мощные толщи граувакковых песчаников, кремнистых и углистых алевролитов и сланцев образуют сложные ритмично построенные толщи, а роль собственно вулканических лавовых потоков несколько снижается, что свидетельствует о большей степени тектонической дифференциации и большей глубине бассейна седиментации в период рудообразования.

Наиболее контрастные отличия от казахстанско-российских аналогов демонстрируют разрезы рудных районов КНР (Ашеле, Келан, Майзи), где, помимо стандартного набора вулканогенно-осадочных пород и кислых эффузивов, весьма широко распространены карбонатные породы (органо-генные и чистые известняки), а также фиксируются мощные интрузивные тела гранитоидов.

Несмотря на эту локальную специфику, неизменным элементом, объединяющим все рудные районы, остаётся наличие в продуктивных пач-

ках углисто-кремнистых и туфогенно-осадочных горизонтов, которые выступают в качестве основной рудной литологической «ловушки» для колчеданно-полиметаллического оруденения (рис. 3).

Первичный эксплозивный вулканизм в Рудноалтайской зоне (ранний цикл) проявился в излиянии лавовых потоков и лавобрекчий риолитового состава, вероятно, из множества жерловых аппаратов. Последующий этап формирования эффузивных толщ (поздний цикл) связан с активизацией риолитового вулканизма, приуроченного к внутрибассейновым жерловым зонам. Мощность риолитовых лав варьирует в пределах 85–250 м; для них характерны сцементированные выступы и широкое развитие риолитовых гиалокластитов, что в совокупности определяет субмаринную риолитовую ассоциацию. Оба этапа вулканической активности сопровождались VMS-минерализацией, в рамках которой выделяются две основные структурно-вещественные обстановки.

Первая обстановка представлена вулканотектоническими депрессиями третьего порядка, приуроченными к жерловым частям вулканоаппаратов. Эти структуры отличаются сравнительно небольшими размерами (до 500 м), крутыми бортами и присутствием кластических сульфидных руд. В их пределах сформированы месторождения среднего масштаба с высокими содержаниями полезных компонентов (преимущественно свинца и цинка для раннего цикла вулканической активности и цинка с медью – для позднего). Рудовмещающие породы относятся главным образом к околожерловой и промежуточной фациям. Заполнение депрессионных структур на раннем этапе вулканизма осуществлялось терригенными отложениями с незначительным участием риолитовых, реже основных, лавовых потоков (рис. 4, А, обстановка 1А). В данной обстановке образовались месторождения Золотушинское, Новозолотушинское, Таловское, Майское, Чекмарь, Иртышское, Николаевское, Дулаан кхар и другие. Для позднего цикла, характеризовавшегося более интенсивной вулканической деятельностью, перекрывающими породами служат лавы и лавобрекчии преимущественно основного, реже кислого состава с подчинённым количеством терриген-

Рис. 1. Расположение Рудноалтайской, Салаирской, Улугуйской металлогенических зон, Иберийского пиритового пояса и района Батерст:

1–2 – металлогенические зоны: 1 – Салаирская, 2 – Улугуйская; 3 – район Батерст; 4 – Рудноалтайская металлогеническая зона; 5 – Иберийский пиритовый пояс; 6 – месторождения типа VMS

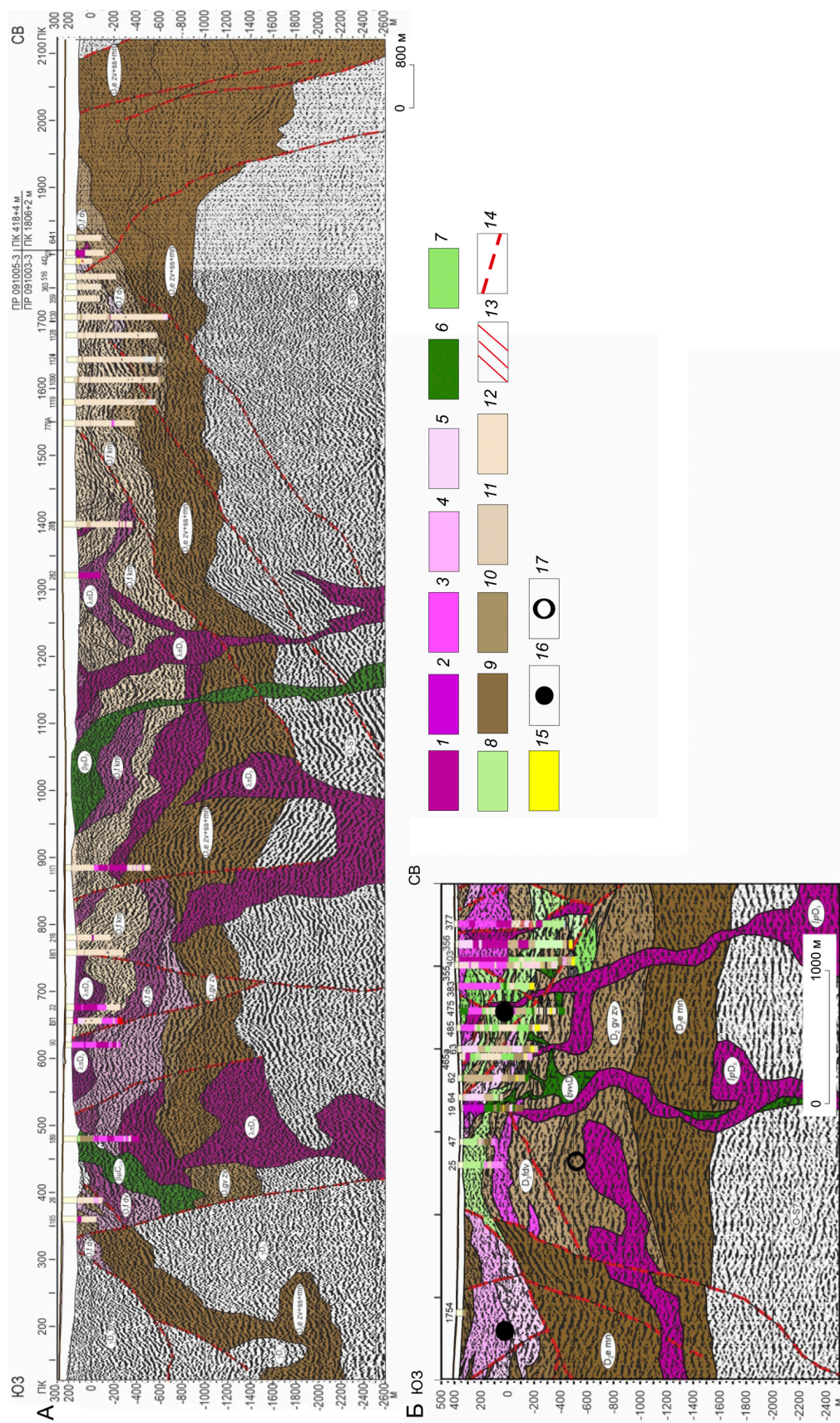


Рис. 2. Совмещённые сейсмический (МОГТ-2Д-ВРС) и литологические разрезы, с использованием материалов [19]:

А – Рубцовский рудный район, Б – Змеиногорский рудный район (фрагмент): 1 – риолиты, риодациты «крупновкрапленные», автоматматические брекчи риолитового состава; 2 – риодациты афировые; 3 – лавобрекчи риодацитового и риолитового состава; 4 – лавы риодацитового и риолитового состава; 5 – туфы риодацитового, риолитового и смешанного состава, мелкообломочные; 6 – габбро-долериты, габбро-диабазы; 7 – лавобрекчи андезибазальтового состава; 8 – лавы андезибазальтового состава; 9 – переслаивание туфов риолитового состава, туфопесчаников, аргиллитов, туфоалевролитов и кремнисто-глинистых сланцев; 10 – туфопесчаники; 11 – аргиллиты; 12 – алевролиты; 13 – метасоматиты; 14 – разрывные нарушения; 15 – полиметаллическая минерализация; 16 – колчеданно-полиметаллические месторождения; 17 – потенциальные колчеданно-полиметаллические месторождения

ных и вулканогенно-терригенных отложений (обстановка 1Б). Морфология рудных тел варьирует от линзовидной и холмообразной до штокверковой в канальных зонах экструзивных построек. К этой обстановке относятся Лазурское, Захаровское, Западно-Захаровское, Таловское, Рубцовское, Иртышское, Николаевское, Березовское, Новоберезовское, Ашеле и другие месторождения.

Вторая обстановка связана с межвулканическими депрессиями (первые километры), удалёнными от центров вулканической активности и функционировавшими как локальные бассейны осаднения (химического и механического) сульфидного материала. Хемогенные сульфиды накапливались в депрессиях преимущественно под воздействием высокоминерализованных морских вод повышенной плотности, обогащённых металлами.

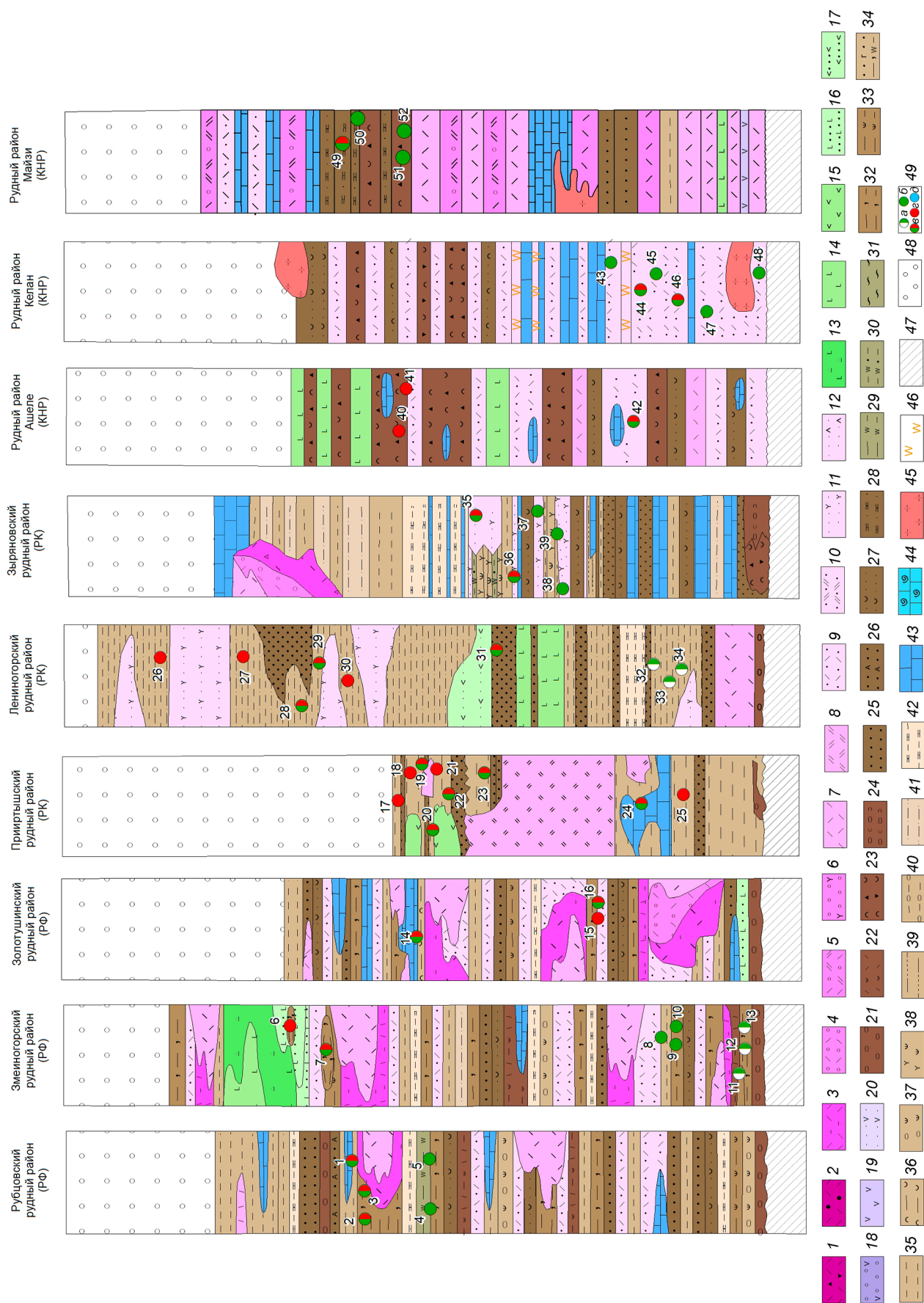
В этих же депрессиях локализованы кластические сульфиды, возникшие при разрушении сульфидонасыщенных подводных каналов, сульфидных холмов и других построек. На многих месторождениях рудная минерализация концентрируется в алевролитах и полимиктовых слоистых песчаниках. Придонные депрессии нередко достигают значительных размеров (до нескольких километров), характеризуются пологими бортами и заполнены отложениями промежуточной и удалённой фаций относительно центров вулканической активности. В подобных структурах локализованы крупные, а иногда и гигантские месторождения. Среди них выделяются два подтипа: с чётко выраженной корневой частью подводного канала и формированием проксимальных рудных тел линзовидной или пластообразной формы (см. рис. 4, Б, обстановка 2А) – Корбалихинское, Юбилейное, Степное, Семёновское, Риддер-Сокольское, Новоленинское, Зыряновское, Малеевское, Артемьевское, Снегиревское и др.; без отчётливого подводного канала – с дистальными рудными залежами пластовой и даже лентообразной морфологии (обстановка 2Б) – Орловское, Тишинское, Греховское II, Зареченское, Среднее, Кекетале, Вуласигу, Кейнбулейк, Талате, Темирт и др. Захоронение придонных депрессий, аналогично первому типу структур, на раннем этапе вулканизма происходило за счёт терригенных отложений с ограниченным участием кислых, реже основных, лавовых потоков. На втором этапе перекрывающими породами выступают лавы и лавобрекчии преимущественно ос-

новного, реже кислого состава с подчинённым количеством терригенных и вулканогенно-терригенных отложений.

Салаирская металлогеническая зона. Сходные палеотектонические и литолого-фациальные условия проявлены в Салаирской металлогенической зоне (МЗ), расположенной на территории Новосибирской, Кемеровской областей и Алтайского края. Здесь рудовмещающими являются нижнекембрийские вулканогенно-осадочные породы (печеркинский вулканический комплекс), относящиеся к двум геологическим формациям натриевого ряда толеитовой серии: нижней – последовательно дифференцированной базальт-андезит-дацит-риолитовой и верхней – контрастной базальт-риолитовой. Отложения этих формаций соответствуют двум циклам вулканической активности в регионе [3, 16, 21, 22, 27–29, 31].

Кислые разности пород представлены преимущественно дацитами с резким преобладанием натрия в сумме щелочей и аномально высокой кремнезёмистостью; грубообломочные разности имеют ограниченное развитие. Подводный характер накопления вулканогенных отложений подчёркивается их переслаиванием с прослоями и линзами осадочных вулканогенно-терригенных, терригенно-карбонатных пород, известняков, углеродсодержащих и кремнистых сланцев (рис. 5). Породы среднего и основного состава распространены в подчинённом количестве и представлены отдельными линзами андезибазальтов и базальтов, реже их туфов существенно натриевой серии. Субвулканические и жерловые постройки формировались в линейных зонах и узлах, трассирующих глубинные разломы (Кузнецкая зона, Аричьевский блок и др.), а также в местах замыкания крупных линейных антиклинальных поднятий и купольных структур (Ангурепский блок). При этом накопление лавовых и пирокластических фаций происходило на склонах крупных вулканических аппаратов и в прилегающих впадинах. Для колчеданных месторождений и рудопроявлений характерна пространственная приуроченность к областям развития жерловых, околожерловых и промежуточных фаций риолитоидного вулканизма.

Рудные районы представляют собой крупные вулканотектонические депрессии, осложнённые впадинами, соответствующими рудным полям. Основные промышленные концентрации свинца, цинка, меди, серебра и золота связаны с верх-



ними горизонтами разреза. В пределах Салаирской металлогенической зоны выделяются четыре рудных района: Огнево-Романовский, Еловско-Которовский, Салаирский и Пуштулимский.

Все известные промышленные месторождения сосредоточены в Салаирском рудном районе: Салаирское (Кварцитовая Сопка, Первомайское, Первый, Второй, Третий рудник, Спорное, Александровское, Слепое), Каменушинское, Ново-Урское, Белоключевское, Самойловское, Ускандинское, а также ряд перспективных рудопроявлений

(Крестьянское, Чечулихинское и др.) [3, 16, 21, 22, 27–29, 31].

Структурно-вещественные обстановки аналогичны описанным для Рудноалтайской зоны. Месторождения тяготеют к областям развития жерловых, околожерловых и промежуточных фаций риолитоидного вулканизма, занимая вершинные или склоновые части экструзивных куполов. Стратиформные руды пространственно и генетически связаны с вулканизмом и локализованы преимущественно в породах промежуточ-

Рис. 3. Литологические колонки рудных районов Рудноалтайской металлогенической зоны, с использованием материалов [9, 11, 13, 19, 20, 53, 58, 59]:

1–12 – фации вулканогенных пород кислого состава: 1 – автомагматические брекчии риолитов, 2 – риолиты крупновкрапленные, 3 – лавобрекчии риолитов, 4 – туфы риолитового состава крупнообломочные, 5 – туфы риолитового состава грубообломочные, 6 – туфы смешенного состава грубообломочные, 7 – лавы риолитов, 8 – лавы риодацитов, 9 – туфы риолитового состава мелко-, среднеобломочные, 10 – туфы риодацитового состава мелко-, среднеобломочные, 11 – туфы смешанного состава мелко-, среднеобломочные, 12 – туфы дацитового состава мелко-, среднеобломочные; 13–17 – фации вулканогенных пород основного состава: 13 – лавобрекчии базальтов, 14 – лавы базальтов, 15 – лавы андезибазальтов, 16 – туфы базальтового состава мелко-, среднеобломочные, 17 – туфы андезибазальтового состава мелко-, среднеобломочные; 18–20 – фации вулканогенных пород основного состава: 18 – туфы андезитового состава крупнообломочные, 19 – лавы андезитов, 20 – туфы андезитового состава мелко-, среднеобломочные; 21–42 – фации вулканогенно-осадочных пород: 21 – конгломераты, 22 – туффиты кислого состава, 23 – туфобрекчии, 24 – туфоконгломераты, 25 – песчаники, 26 – песчаники аркозовые, 27 – туфопесчаники, 28 – известковые песчаники, 29 – алевролиты (сланцы) углистые, 30 – аргиллиты углистые, 31 – сланцы, 32 – алевролиты кремнистые, 33 – чередование туффитов кислого состава, туфопесчаников, кремнистых и туфогенных алевролитов, 34 – граувакковые песчаники с прослоями кремнисто-углеродистых сланцев, 35 – алевролиты, 36 – туфоалевролиты, 37 – чередование туффитов основного состава, туфопесчаников, туфоалевролитов, туфогравелитов, туфоконгломератов, 38 – туффиты разного состава, 39 – алевропесчаники, 40 – чередование алевролитов, песчаников, гравелитов, конгломератов, 41 – аргиллиты, 42 – алевролиты углистые; 43 – известняки; 44 – известняки органогенные; 45 – гранитоиды; 46 – кварциты; 47 – подрудные породы; 48 – надрудные породы; 49 – колчеданно-полиметаллические месторождения (минеральный тип): а – галенит-сфалерит-баритовый, б – галенит-сфалерит-пиритсодержащий, в – халькопирит-галенит-сфалерит-пиритовый, г – (галенит)-халькопирит-сфалерит-пиритовый, д – без разделения на типы; месторождения: 1 – Рубцовское, 2 – Захаровское, 3 – Западно-Захаровское, 4 – Таловское, 5 – Степное, 6 – Лазурское, 7 – Корбалихинское, 8 – Семеновское, 9 – Среднее, 10 – Майское, 11 – Стрижковское, 12 – Зареченское, 13 – Змеиногорское, 14 – Юбилейное, 15 – Золотушинское, 16 – Ново-Золотушинское, 17 – Ново-Березовское, 18 – Иртышское, 19 – Шемонаихинское, 20 – Камышинское, 21 – Николаевское, 22 – Артемьевское, 23 – Белоусовское, 24 – Березовское, 25 – Орловское, 26 – Анисимов ключ, 27 – Юбилейно-Снегирихинское, 28 – Гусляковское, 29 – Чекмарь, 30 – Шубинское, 31 – Тишинское, 32 – Ново-Лениногорское, 33 – Долинное, 34 – Риддер-Сокольное, 35 – Малеевское, 36 – Путинцевское, 37 – Зыряновское, 38 – Снегиревское, 39 – Греховское I, II, 40 – Ашеле, 41 – Сарсук, 42 – Кейнбулейк, 43 – Дадонгу, 44 – Вуласигу, 45 – Талате, 46 – Темирт, 47 – Абагонг, 48 – Кыяксия, 49 – Савуси, 50 – Кекетале, 51 – Дация, 52 – Акехарен, 53 – Салаирское, 54 – Июньское, 55 – Белоключевское, 56 – Ново-Урское, 57 – Самойловское, 58 – Каменушинское, 59 – Ключевское III, 60 – Сухарный лог, 61 – Крестьянское, 62 – Ускандинское, 63 – Ключевское II, 64 – Скарновое, 65 – Свинцовое, 66 – Туматтайгинское 2, 67 – Южное, 68 – Дальнее, 69 – Сыынакское 1, 70 – Кызыл-Таштыгское, 71 – Туматтайгинское 1, 72 – Сыынакское 2, 73 – Перевальное, 74 – Рио Тинто, 75 – Ла Сарса, 76 – Консепсьен, 77 – Агуас-Тенидас, 78 – Алжуштрел, 79 – Луиссаль, 80 – Сотил-Миголлас, 81 – Невес-Корво, 82 – Тарсис, 83 – Стратмат, 84 – Карibu, 85 – Брансуик № 12, 86 – Брансуик № 6, 87 – Халф Майл Лэйк, 88 – Хит Стилл

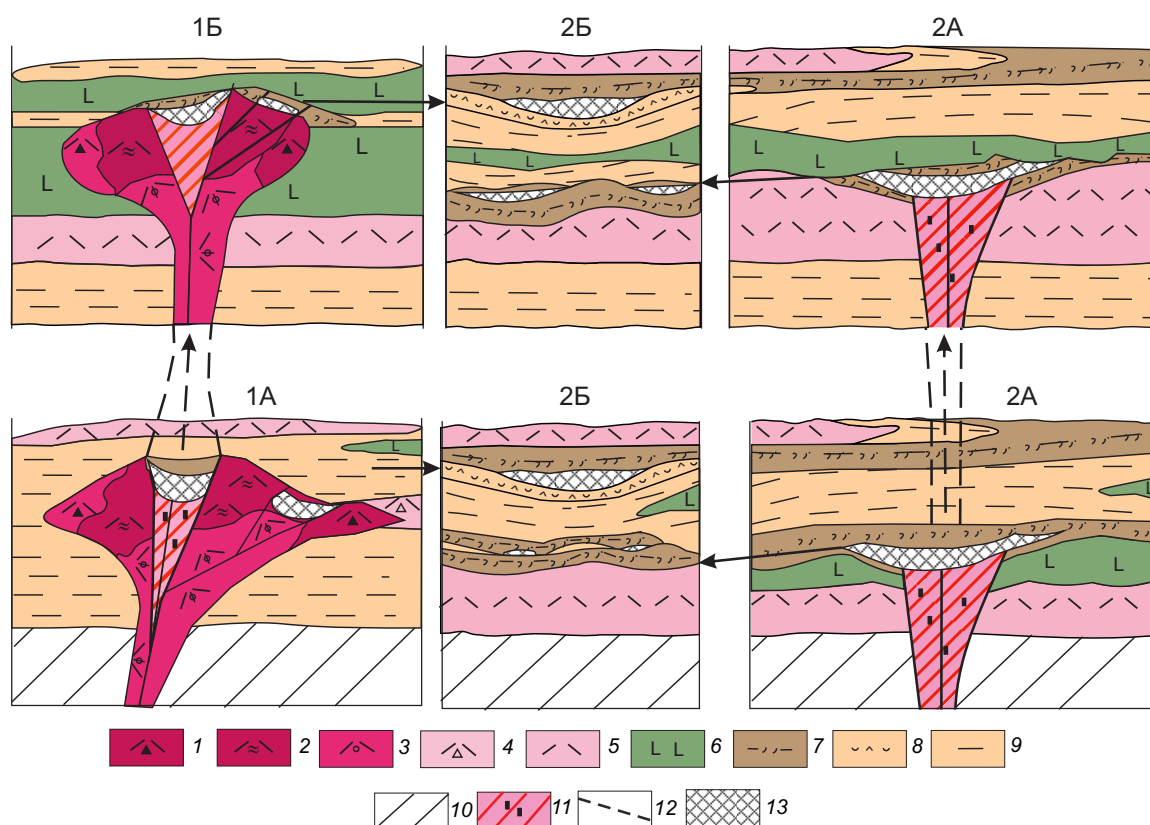


Рис. 4. Структурно-вещественные обстановки формирования колчеданно-полиметаллического оруденения:

1 – автомагматические брекчии риолитового состава; 2 – кластолавы риолитового состава; 3 – риолиты афировые; 4 – лавобрекчии риолитового состава; 5 – лавы риолитового и 6 – базальтового состава; 7 – чередование туфов риолитового состава, туффитов, туфопесчаников, алевролитов; 8 – чередование туфов и туфоалевролитов; 9 – монотонное переслаивание алевролитов и песчаников; 10 – сланцы нижнепалеозойского возраста; 11 – зона подводящего канала с сульфидной минерализацией; 12 – разрывные нарушения; 13 – колчеданно-полиметаллическая руда

ных и удалённых фаций. Основные промышленные концентрации металлов связаны с верхними горизонтами разреза.

Улугуйская металлогеническая зона. Ещё одним элементом Алтае-Саянской провинции служит Улугуйская металлогеническая зона (МЗ) в Республике Тыва, где промышленное колчеданно-полиметаллическое оруденение заключено в нижнекембрийском разрезе. Нижняя часть разреза сложена породами рудовмещающей контрастной риолит-базальтовой формации (туматтайгинская свита), верхняя – туфогенно-осадочными породами с подчинённым значением эффузивов

(сыынакская или тапсинская свита). Разрез отложений отличается значительной латеральной и вертикальной изменчивостью и сложным набором пород. Выделяются жерловые, околожерловые и удалённые фации вулканических построек, в которых широко развиты тела (дайки, штоки, силлы) субвулканических и гипабиссальных интрузий кислого и основного состава (см. рис. 5). Оруденение установлено на различных уровнях нижнекембрийского разреза Улугуйской зоны, однако промышленные скопления руд сконцентрированы в породах верхней половины разреза туматтайгинской свиты. Оруденение тяготеет к

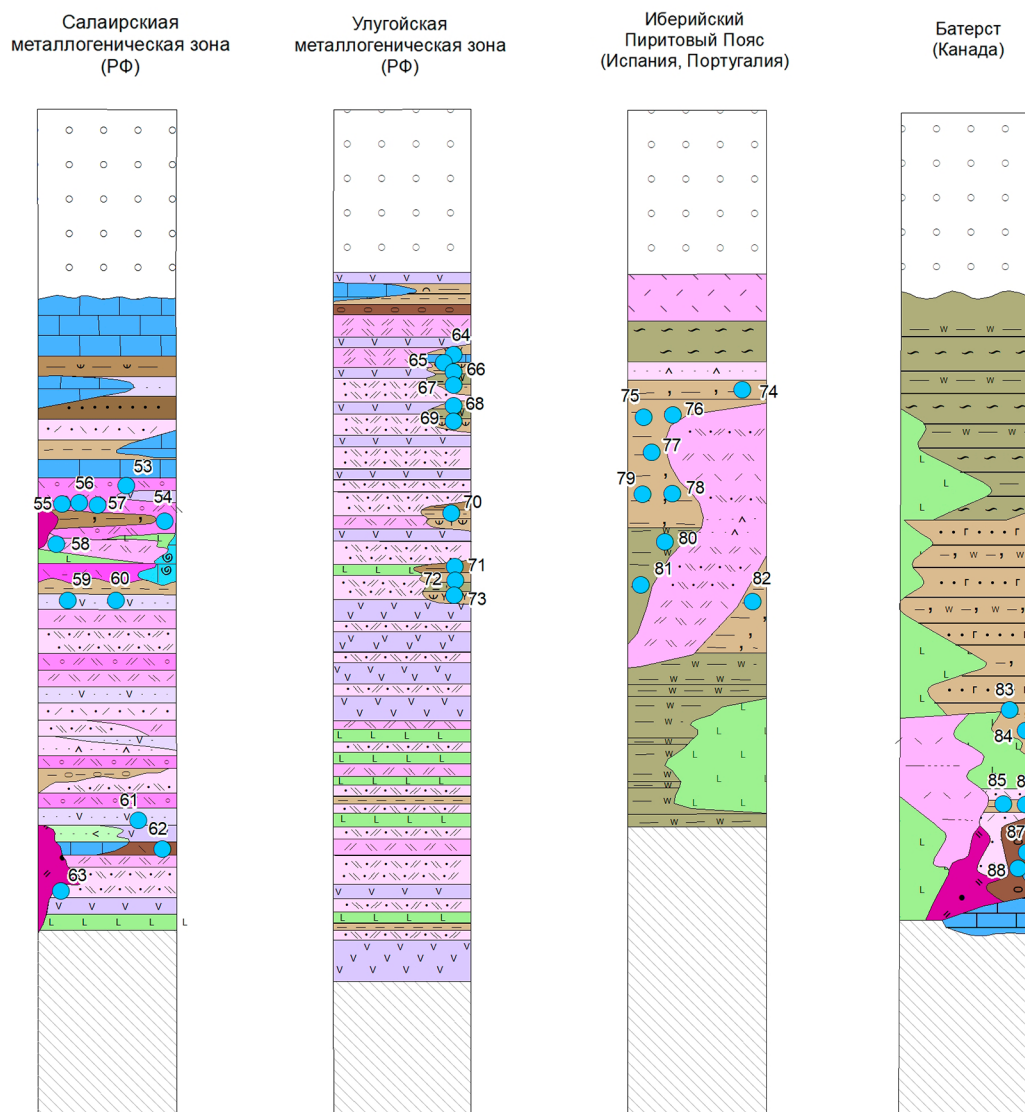


Рис. 5. Обобщённые литологические колонки Салаирской и Улугуйской металлогенических зон, Иберийского пиритового пояса и района Батерст, с использованием материалов [3–5, 10, 15, 16, 23, 27–29, 33, 35, 38, 39, 41, 45, 47, 50]:

см. услов. обознач. к рис. 3

пачкам, обогащённым вулканомиктовым и туфо-генно-осадочным материалом. Породы испытали региональный и динамометаморфизм, около-рудные породы месторождений подверглись гидротермальным изменениям кварц-серицитово-формации. Вулканиды преобразованы в аргиллизиты и вторичные кварциты [4, 5, 10, 18, 23, 27, 31].

Колчеданно-полиметаллическое оруденение Улугуйской зоны сконцентрировано в трёх рудных районах: Кызыл-Таштыгском, Кызыл-Таш-

ском и Оттугайгинском. В пределах зоны выявлены полиметаллические месторождения – Кызыл-Таштыгское и Дальнее, а также ряд перспективных рудопроявлений, включая Сыынакское, Туматтайгинское, Свинцовое, Скарновое, Кызыл-Ташское, Перевальное, Ат-Чолдугское, Хооросское, Южное, Акхемское, Эржекское и другие.

Структурно-вещественные обстановки формирования колчеданно-полиметаллического оруденения аналогичны описанным для Рудноалтай-

ской металлогенической зоны. В частности, для месторождений Кызыл-Таштыгское и Дальнее характерны комбинированные залежи, имеющие форму уплощённых воронок, Т-образных и близких к ним тел, сформировавшихся в пределах депрессионных структур в вершинных частях экстразивных куполов. Согласно с напластованием рудные тела образовались в результате гидротермально-осадочного рудоотложения в депрессионных структурах, а «бескорневые» тела возникли на некотором удалении от подводящих каналов за счёт перетекания рудообразующих рассолов в понижения морского дна.

Иберийский пиритовый пояс (ИПП) [33, 35, 36, 45, 48, 50]. За пределами Алтае-Саянской области наибольший интерес для сравнения представляют Иберийский пиритовый пояс и район Батерст. Разрез ИПП сложен породами от позднего девона до среднего карбона. Фундамент разреза представлен филлит-кварцитов группой (PQ Group) мощностью более 2000 м, сложенной монотонной толщей сланцев, песчаников и кварцитов, а в верхней части – конгломератов и известняков. Выше залегают рудовмещающие породы вулканогенно-осадочного комплекса (VSC), прошедшего сложную эволюцию и представленного чёрными и серыми сланцами, граувакковыми песчаниками, кремнистыми и марганценосными яшмами [33, 35, 45, 50]. Вулканогенные породы имеют бимодальный характер: установлены кислые (риолиты, дациты, риодациты) и основные (базальты, долериты) разности при полном отсутствии или крайне незначительном количестве пород среднего состава (см. рис. 5). Кислые породы слагают преимущественно субвулканические купола и силлы, тогда как основные образуют потоки и дайки. Важной особенностью вулканогенно-осадочного комплекса является наличие в его верхней части регионального маркирующего горизонта – фиолетовых сланцев, часто ассоциирующихся с Mn-содержащими яшмами. Завершает разрез флишевая группа Кулм (Culm Group) – турбидиты. Степень метаморфизма пород низкая (зеленосланцевая фация), с увеличением интенсивности к северу и в зонах сдвиговых деформаций, что позволило в ряде случаев сохранить первичные текстуры руд (колломорфные, сфероидальные, фрамбоидальные) [36, 48]. Гидротермальные изменения пород также имеют характерные черты. Помимо локальных ореолов, связанных с рудными телами (внутренняя хлоритовая

зона, внешняя серицитовая), в породах вулканогенно-осадочного комплекса VSC проявлена региональная спилитизация.

Колчеданно-полиметаллические залежи ИПП демонстрируют вариабельность морфологии, текстур и минерального состава. Отличительной чертой месторождений является наличие двух чётко выраженных типов руд, различающихся по характеру вмещающих пород и металлогенической специализации. Первый тип (южная зона) представлен гигантскими залежами, ассоциируемыми с чёрными сланцами (Невес-Корво, Тарсис, Сотил-Миголлас, Асналькольяр), и характеризуется преобладанием пирита при относительно низких содержаниях цветных металлов. Второй тип (северная зона) представлен залежами, расположенными непосредственно в кислых вулканитах (Рио Тинто, Ла Сарса, Сан-Мигель), и отличается более высокими содержаниями меди, цинка и свинца. Морфологически рудные тела представляют собой линзовидные залежи, часто тектонически расслоённые, мощностью от нескольких метров до 100–120 м.

Рудный район Батерст [38, 39, 43], напротив, обладает более древним, ордовикским, возрастом вулканогенно-осадочных комплексов, сформировавшихся при рифтогенезе. Эти отложения относятся к группе Тетагуче, которая перекрывает терригенные отложения группы Мирамичи. Нижняя часть разреза сложена преимущественно лавами и туфами риолитового состава с прослоями алевропесчаников, конгломератов и известняков. Верхняя часть разреза представлена риолитовыми потоками, куполами и гиалокластитам (см. рис. 5). Переход между этими двумя толщами маркируется горизонтом железистых кварцитов (горизонт Брансуик). Этот горизонт служит региональным стратиграфическим репером и свидетельствует о перерыве в вулканизме, совпавшем с максимальной гидротермальной активностью. Рудовмещающие породы претерпели интенсивную полифазную деформацию и гидротермальные изменения, сформировавшие зональные ореолы. Эти процессы сопровождались значительным перераспределением вещества по механизму растворения под давлением, что особенно характерно для кварц-полевошпатовых пород лежащего бока. В удалённых от рудных тел участках фиксируется слабая калиевая и натриевая метасоматическая переработка (альбитизация, адуляризация). Оруденение локализуется преимущественно

но на границе между основными и кислыми вулканитами, а также в подошве терригенного чехла. Наиболее значительные концентрации сульфидных руд приурочены к месторождениям Брансуик № 12 и № 6, которые демонстрируют классическую зональность проксимальных колчеданных залежей: нижняя медно-колчеданная зона (халькопирит, пирротин, пирит) сменяется вверх массивной пиритовой, а затем цинково-свинцовой зоной с тонкой полосчатой текстурой [38, 39, 43].

Минеральные типы руд. Все рассматриваемые объекты относятся к классу колчеданных или колчеданно-полиметаллических руд, формирующихся преимущественно в вулканогенно-осадочных толщах, и обнаруживают тесную пространственно-генетическую связь с гидротермально-метасоматическими процессами. Общим для перечисленных провинций является доминирование в рудах пирита, сфалерита, галенита и халькопирита при постоянном присутствии блёклых руд и минералов серебра. Благородные металлы концентрируются главным образом в виде твёрдых растворов в сульфидной матрице, а в высвобождённой форме – как самородное золото, электрум, акантит, аргентит, разнообразные теллуриды и сульфосоли.

Вместе с тем каждая зона характеризуется специфическим набором минеральных типов руд, отражающим различия в составе вмещающих пород и физико-химических параметрах рудоотложения. В Рудноалтайской зоне, где месторождения приурочены к медно-свинцово-цинково-колчеданной формации, выделяются четыре минеральных типа – от существенно баритового до халькопирит-сфалерит-пиритового, – а аномально высокая доля золота и серебра делает эти объекты практически уникальными по ценности благороднометалльной составляющей. Салаирская зона характеризуется тремя типами руд, среди которых преобладают золото-серебросодержащие колчеданно-барит-полиметаллические и медно-колчеданные разности; акцессорная минерализация включает электрум, аргентит и сульфосоли серебра. Улугуйская зона отличается наибольшим разнообразием рудных типов – от серно-колчеданного до барит-полиметаллического – и зональным строением залежей; среди редких минералов отмечаются теннантит, тетраэдрит, теллуrowисмутит. В Иберийском пиритовом поясе минеральные типы контролируются литологией: в южной зоне преобладают существенно пи-

ритовые руды с низкими содержаниями цветных металлов, в северной – медно-цинково-свинцовые. Главные минералы – пирит, сфалерит, галенит, халькопирит, барит; локально присутствует касситерит. В районе Батерст развиты медно-колчеданные, пиритовые и цинково-свинцовые руды с отчётливой вертикальной зональностью. Главные минералы – пирит, халькопирит, пирротин, сфалерит и галенит; барит играет второстепенную роль.

Эталонные месторождения. В качестве эталонных объектов, иллюстрирующих выявленные закономерности, могут быть рассмотрены несколько месторождений.

Полиметаллическое месторождение Талате расположено в пределах Рудноалтайской металлогенической зоны в рудном районе Келан (КНР). Оно приурочено к вулканогенно-осадочным породам формации Кангбутибао раннедевонского возраста, которые представлены метатифами, метатифобрекчиями риолитового и дацитового составов, а также сланцами, сформировавшимися в результате преобразования вулканогенно-осадочных пород (рис. 6). Рудные залежи характеризуются пластовой, линзовидной и жильной формами. Основные типы руд – свинцово-цинковый, полиметаллический. Отмечаются повышенные содержания железа. Текстуры руд: массивные, прожилковые, вкрапленные, полосчатые, пластинчатые, рассеянные и брекчиевидные. Главные рудные минералы: пирит, сфалерит, галенит, магнетит, гематит, реже халькопирит, пирротин, арсенопирит и молибденит. Средние содержания цинка составляют 2,19, а свинца – 1,92 % [46].

В Салаирской зоне наиболее крупным в пределах Урского рудного поля (Салаирский рудный район) является месторождение Ново-Урское. Вмещающими породами являются туфы различного состава, туфопесчаники, туфоалевролиты, туфогравелиты, туфоконгломераты, а также туффиты риолитового состава, кремнистые и туфогенные алевролиты (рис. 7). Рудное тело представляет собой субсогласную линзу, прослеженную по простиранию на 630–640 м при средней мощности 12–20 м и локальных раздувах до 70 м. Резко преобладают массивные колчеданные разности с высокими концентрациями пирита (до 85–90 %), сфалерита и халькопирита; в зоне окисления фиксируются высокobarитовые золотоносные охры. В строении руд чётко выделяются три типа: сплошные, прожилковые и вкрапленные руды,

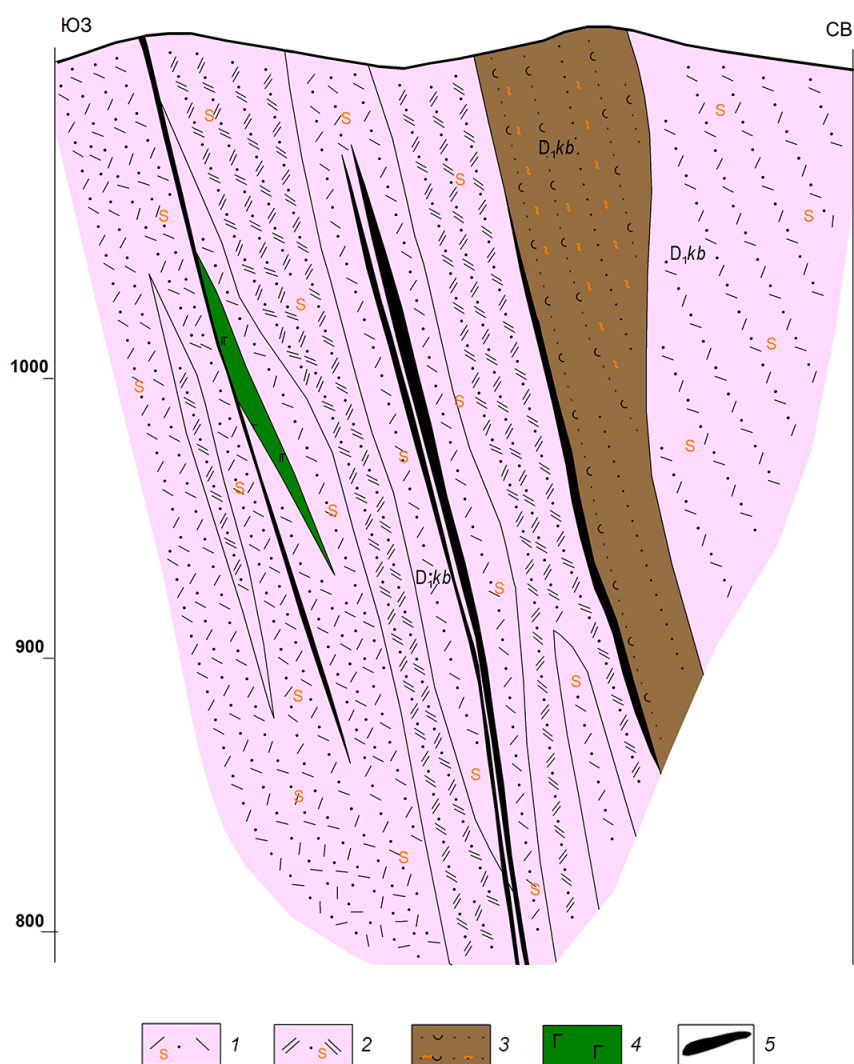


Рис. 6. Литолого-фациальный разрез месторождения Талате, с использованием материалов [46]:

1 – чередование метатифов и метатифобрекчии риолитового состава; 2 – чередование метатифов и метатифобрекчии дацитового состава; 3 – сланцы по вулканогенно-осадочным породам риолитового состава (туффитам, туфопесчаникам и алевролитам); 4 – габбро-долериты; 5 – полиметаллические руды (с железом)

которые формируют рудное тело. Прожилковые и вкрапленные имеют подчинённое значение и окружают сплошные руды довольно широким ореолом [3, 29].

В Улугуйской зоне детально изучено Кызыл-Таштыгское месторождение, залегающее в многолетнемёрзлых породах на высотах 1600–1800 м. Разрез месторождения включает туфы, лавы различного состава, а также алевролиты. Интенсивно развиты кварц-серицитовые, хлорит-серици-

товые и хлоритовые метасоматиты (рис. 8). Все рудные тела месторождения компактно размещаются в пределах узкой полосы протяжённостью 1200 м, шириной 130–250 м. Средние содержания цинка составляют 10,8, а свинца – 1,74 % сопровождаются существенными концентрациями кадмия, селена, серебра и золота. Основным промышленным типом являются медно-цинковые руды. Текстуры руд: массивные, брекчиевые, вкрапленные. Породы в пределах месторожде-

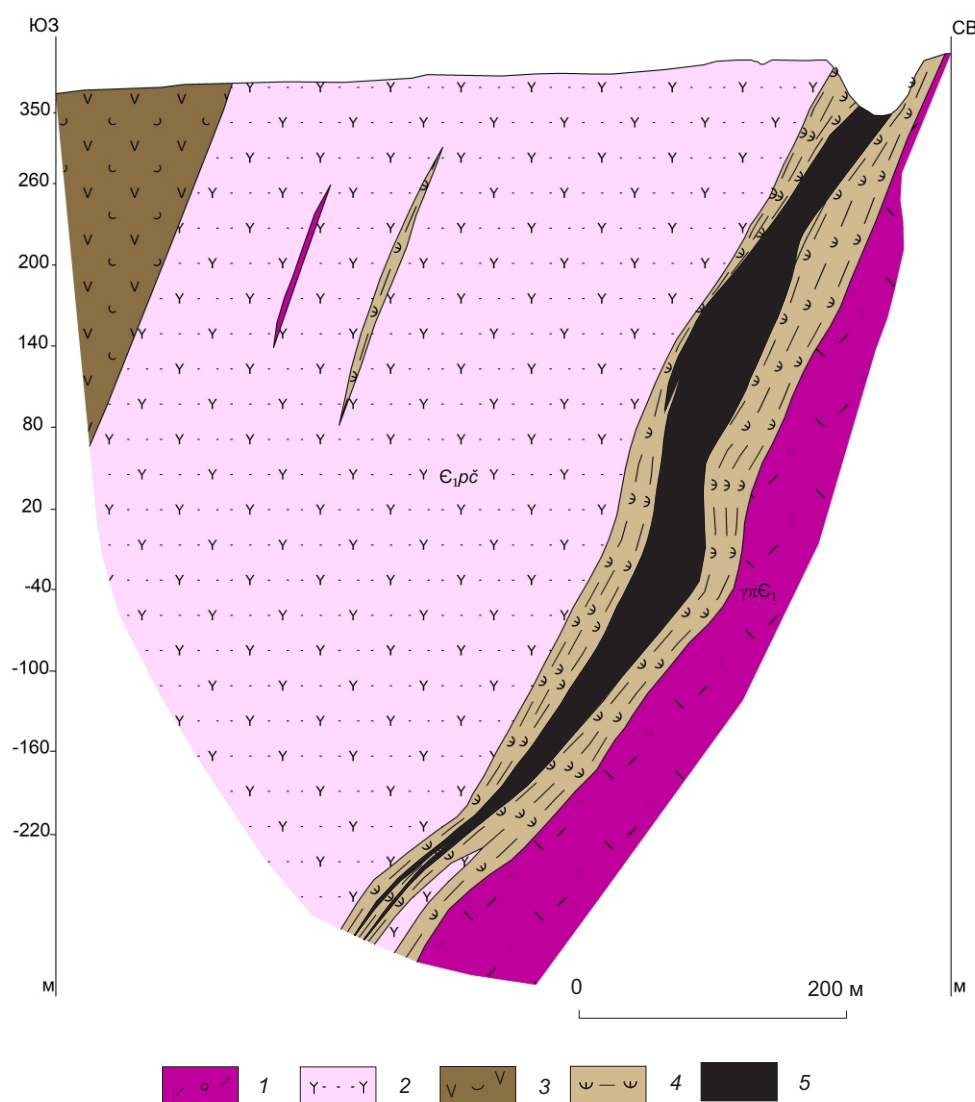


Рис. 7. Лито-фацальный разрез месторождения Ново-Урское, с использованием материалов [3, 29]:

1 – риолиты, риодациты «крупновкрапленные»; 2 – туфы смешанного состава мелкообломочные; 3 – чередование туфов андезитового состава, туфопесчаников, туфоалевролитов, туфогравелитов, туфоконгломератов; 4 – чередование туффигов риолитового состава, туфопесчаников, кремнистых и туфогенных алевролитов; 5 – колчеданно-полиметаллические руды (без разделения на типы)

ния подверглись региональному метаморфизму фации зелёных сланцев, околорудные породы месторождения затронуты гидротермальными изменениями кварц-серицитово-формации [4, 5, 10, 18, 23].

Месторождение Рио Тинто находится в испанской части ИПП и приурочено к пологой синклинальной структуре, выполненной породами вул-

каногенно-осадочного комплекса: лавами различного состава, граувакко-сланцевыми породами, а также серыми, зелёными и фиолетовыми сланцами (рис. 9). Характерная особенность – чёткое пространственное разделение руд: в верхней части разреза залегают пластовые залежи массивных колчеданно-полиметаллических руд (Zn-Pb-Cu), а в основании – мощные (до 300 м) зоны

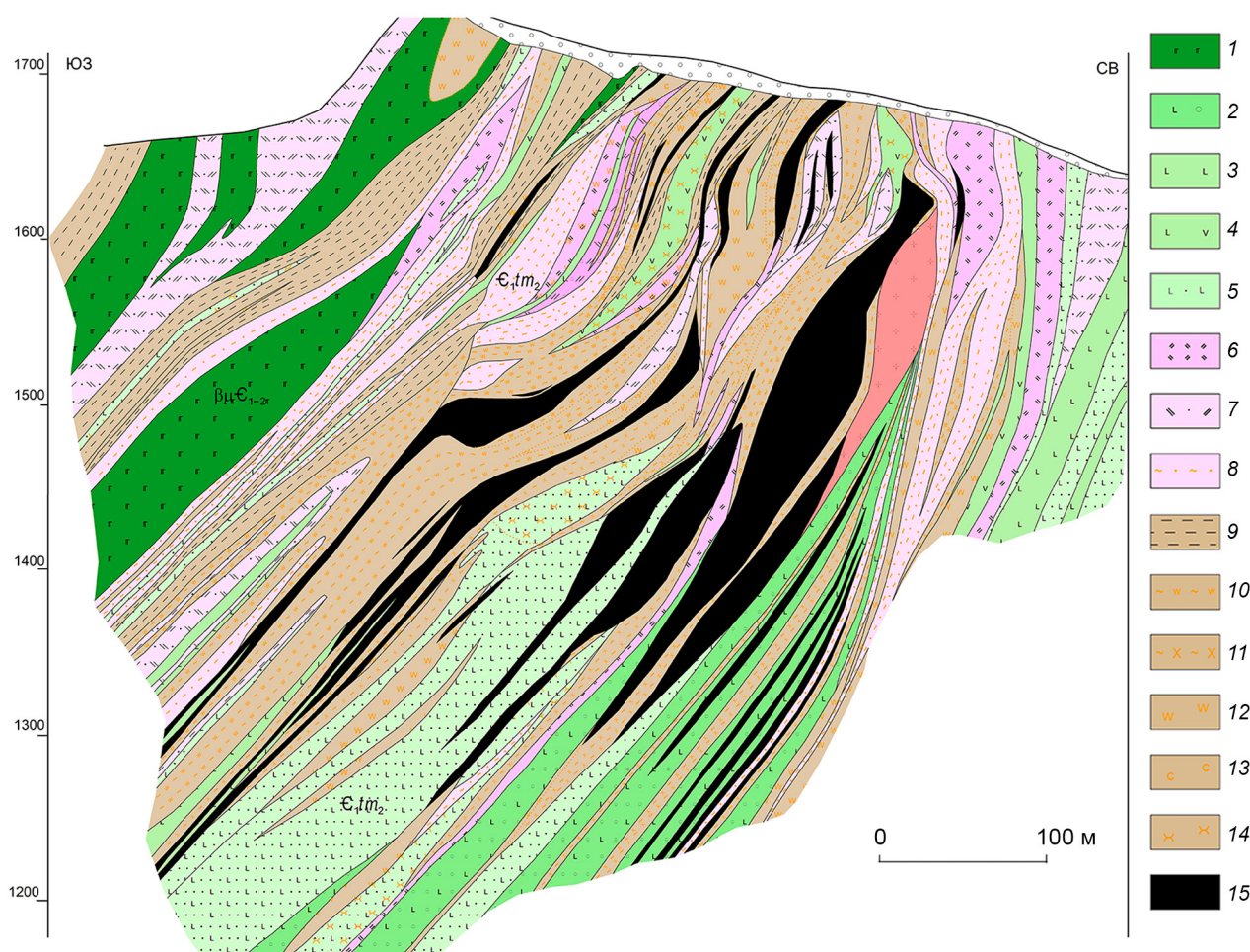


Рис. 8. Литолого-фациальный разрез месторождения Кызыл-Таштыгское, с использованием материалов [4, 5]:
 1 – габбро-долериты; 2 – туфы грубообломочные базальтового состава; 3 – лавы базальтового и 4 – андезибазальтового состава; 5 – туфы мелкообломочные базальтового состава; 6 – лавы риолитового и риодацитового состава; 7 – туфы мелкообломочные риолитового и риодацитового состава; 8 – алевриты; 9 – рассланцованные туфы риолитового состава; 10 – кварц-серицитовые и хлорит-серицитовые метасоматиты; 11 – хлоритовые, кварц-хлоритовые и серицит-хлоритовые метасоматиты; 12 – кварциты; 13 – серицитолиты; 14 – хлоритолиты; 15 – колчеданно-полиметаллические руды (без разделения на типы)

штокверковых медно-колчеданных руд. Месторождение отрабатывается с древних времён, основные запасы меди связаны с медно-колчеданными рудами [35, 45].

Месторождение Невес-Корво расположено в португальской части ИПП, является одним из наиболее значимых в регионе и уникально по содержанию олова. Представлено серией линзовидных рудных тел (Невес, Корво, Граса, Замбужал, Ломбадор) среди вулканогенно-осадочных пород:

углеродистых, кремнистых, хлоритовых сланцев, туффитов, граувакковых песчаников, с прослоями карбонатных пород, а также лав риолитового состава (рис. 10). Характеризуется чёткой металлогенической зональностью: в штокверковой зоне и основании рудных тел развиты богатые медные руды с высокими концентрациями Au (до 95 г/т), Co, Bi и Ag. Касситерит образует как тонкие прослои в медных рудах, так и самостоятельные линзы [33, 36, 47, 48].

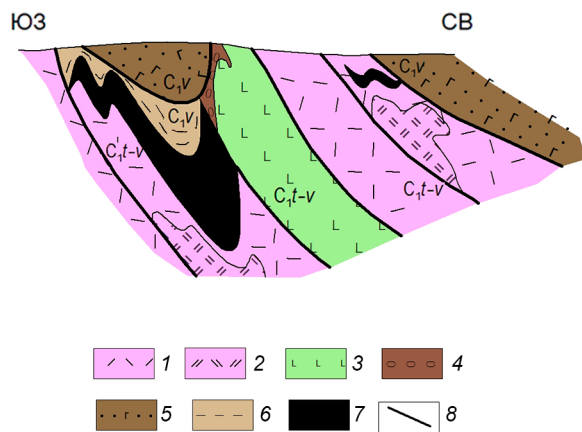


Рис. 9. Литолого-фациальный разрез месторождения Рио Тинто, с использованием материалов [35]:

1–3 – лавы: 1 – риолитового, 2 – риодацитового и 3 – андезибазальтового составов; 4 – конгломераты; 5 – граувакко-сланцевые породы; 6 – сланцы серые, зелёные и фиолетовые; 7 – колчеданно-полиметаллические руды (без разделения на типы); 8 – разрывные нарушения

Вмещающими оруденение породами месторождений Брансуик № 12 и № 6 (район Батерст, Канада) являются лавы, туфы, туффиты риолитового состава с прослоями алевролитов. Также в строении разреза важную роль играют лавы и туфы базальтового состава, риолиты, а также габбро-долериты (рисунки 11, 12). В их строении выделяется нижняя медно-колчеданная зона, сложенная халькопиритом, пирротинном и пиритом, которая переходит в массивную пиритовую зону, а затем в цинково-свинцовую зону с тонкой полосчатой текстурой, обусловленной чередованием сфалерита, галенита и пирита. В рудах, помимо основных компонентов, установлены повышенные содержания железа, таллия, кобальта, мышьяка и сурьмы в зоне штокверка, а также тонкая вкрапленность золота и минералов висмута в сульфидной массе. Месторождение Брансуик № 6 является меньшим по масштабам аналогом Брансуик № 12: оно демонстрирует сходную вертикальную зональность, однако масштабы оруденения и мощность штокверка существенно уступают [38, 39, 41–44].

Изотопный состав серы. Изучение изотопного состава серы сульфидных и сульфатных ми-

нералов из колчеданно-полиметаллических месторождений различных металлогенических провинций мира выявляет фундаментальные различия в источниках рудного вещества, физико-химических условиях минералообразования и эволюции палеогидротермальных систем. Сравнительный анализ данных по сорока шести объектам Рудноалтайской, Салаирской и Улугуйской зон Алтае-Саянской металлогенической провинции, а также по Иберийскому пиритовому поясу и рудному району Батерст (Канада) позволяет не только охарактеризовать специфику каждого региона, но и проследить общие закономерности (таблица, рис. 13).

Для Улугуйской металлогенической зоны (Восточная Тува), детально охарактеризованной на примере Кызыл-Таштыгского рудного поля, свойственен устойчиво утяжелённый изотопный состав серы сульфидов при весьма низких вариациях $\delta^{34}\text{S}$. Подавляющее большинство (около 90 %) проанализированных проб гидротермальных и гидротермально-метасоматических руд укладывается в узкий интервал от +5,0 до +9,0 ‰ при среднем значении по месторождению около +6,4 ‰. При этом наблюдается отчётливая вертикальная зональность: от нижних рудоносных уровней (рудопроявление Перевальное, среднее +5,9 ‰) к верхним (месторождение Дальнее, среднее +8,8 ‰) происходит последовательное, хотя и незначительное утяжеление изотопного состава серы, что связывается с возрастанием доли экзогенной сульфатной серы морской воды в процессе рудоотложения. Сульфатная сера баритов демонстрирует экстремально тяжёлые значения от +25,0 до +38,7 ‰. Резким контрастом на этом фоне выступают слоистые руды, для пирита которых зафиксирован широчайший диапазон $\delta^{34}\text{S}$ – от -15,8 до +22,5 ‰, что указывает на активное вовлечение изотопно-лёгкой серы, вероятно, биогенного происхождения на этапах синхронного осадконакопления рудообразования. Изотопные характеристики рудокластов колчеданных руд (устойчиво отрицательные значения) резко отличаются от таковых для рудокластов полиметаллических руд (положительные значения), что свидетельствует о принципиально различных источниках серы и подтверждает полигенность и полихронность формирования месторождений Кызыл-Таштыгского поля.

Салаирская металлогеническая зона, согласно данным по месторождению Салаирское (Пер-

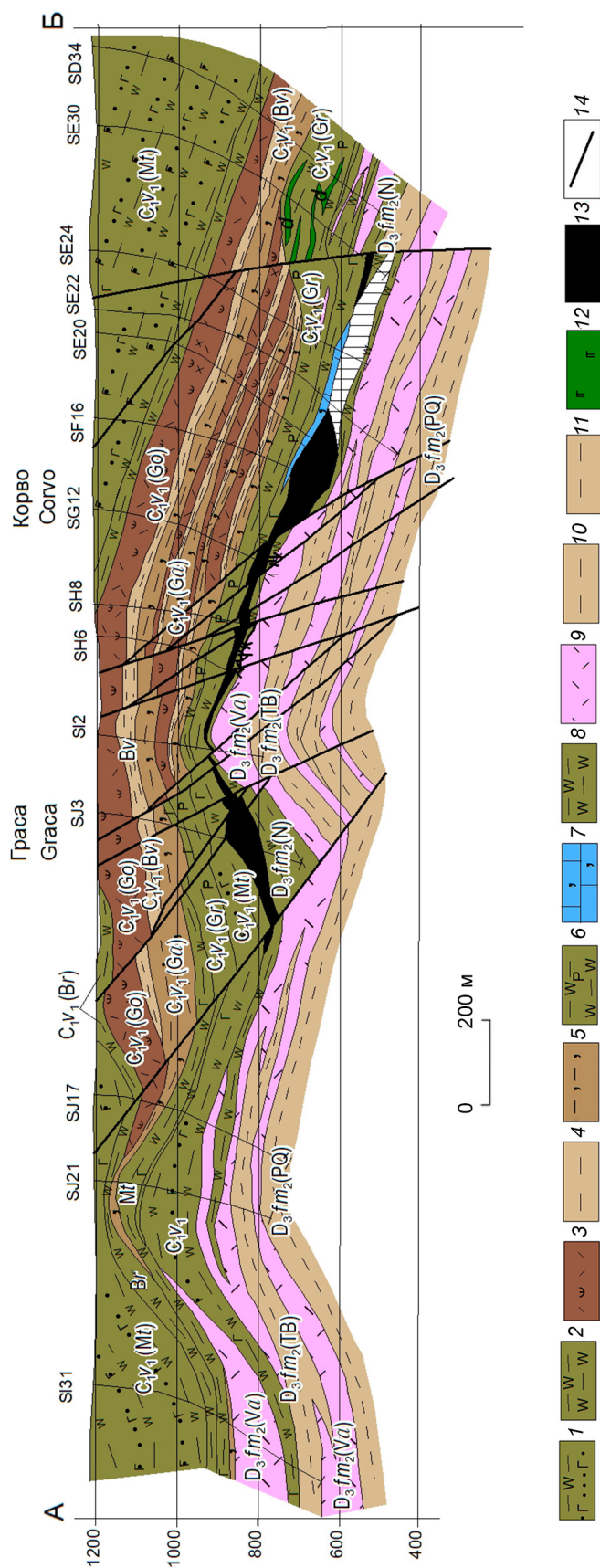


Рис. 10. Литолого-фациальный разрез месторождения Навес-Корво, с использованием материалов [47]:

1–7 – нижний карбон, визейский ярус, верхний подъярус: 1 – формация Мертола: граувакковые песчаники и чёрные сланцы, $C_{1v2}(Mt)$, 2 – формация Бранканес: углеродистые сланцы, $C_{1v2}(Br)$, 3 – формация Годиуньо: кремнистые сланцы и туффиты, $C_{1v2}(Go)$, 4 – формация Борра де Винью: зелёные и фиолетовые сланцы, $C_{1v2}(Bv)$, 5 – формация Грандасош: кремнистые сланцы с прослоями карбонатных пород, $C_{1v2}(Ga)$, 6 – формация Граса: серые и чёрные сланцы с прослоями кремнисто-фосфатных конкреций, C_{1v2} , 7 – яшмы, карбонаты, хлоритовые сланцы, $C_{1v2}(J)$; 8–11 – верхний девон, фаменский ярус, верхний подъярус: 8 – формация Навес: чёрные сланцы, $D_3fm_2(N)$, 9 – лавы риолитового состава, $D_3fm_2(Va)$, 10 – туфобрекции, сланцы с прослоями карбонатных и вулканогенных пород, $D_3fm_2(TB)$, 11 – сланцы и кварциты $D_3fm_2(PQ)$; 12 – вулканогенные породы среднего и основного состава; 13 – колчеданно-полиметаллические руды (с оловом, без разделения на типы); 14 – разрывные нарушения

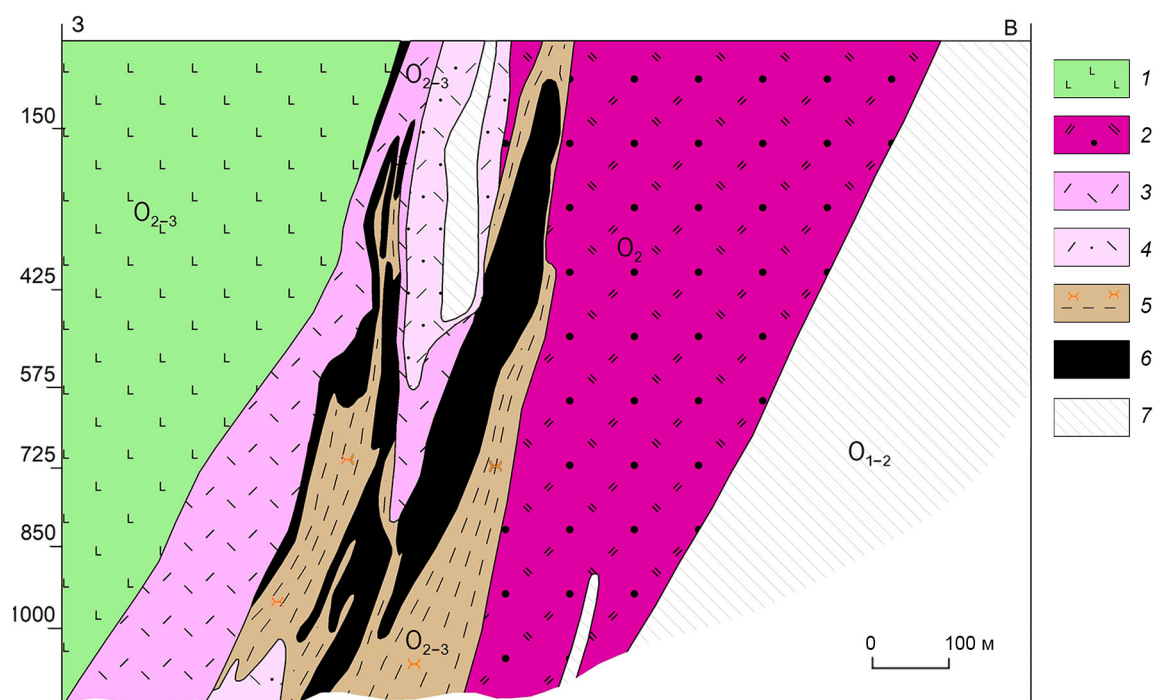


Рис. 11. Лито-фацальный разрез месторождения Брансуик № 12, с использованием материалов [39]:

1 – лавы и туфы базальтового состава; 2 – риолиты афировые и крупновкрапленные; 3 – чередование лав и туфов риолитового состава; 4 – туфы и туффиты риолитового состава; 5 – алевролиты хлоритизированные; 6 – колчеданно-полиметаллические руды (с железом); 7 – нижележащие породы: сланцы, песчаники

вомайская рудная зона), демонстрирует изотопный состав сульфидной серы в диапазоне от +2,3 до +7,2 ‰. Эти значения, обогащенные тяжелым изотопом ^{34}S , свидетельствуют о существенном участии в рудообразовании сульфата морской воды. Характер распределения $\delta^{34}\text{S}$ в разрезе месторождения служит дополнительным аргументом в пользу вулканогенно-гидротермально-осадочного генезиса сульфидных залежей Салаира и указывает на отсутствие существенного перераспределения серы при последующих метаморфических преобразованиях.

Рудноалтайская металлогеническая зона, охватывающая территории как российского, так и казахстанского и китайского Алтая, характеризуется значительно более сложной и гетерогенной картиной распределения изотопов серы, что отражает многообразие источников рудного вещества в пределах этого региона.

В российской части (Змеиногорский, Рубцовский, Золотушинский районы) наблюдается ши-

рокий диапазон значений $\delta^{34}\text{S}$ – от -12,25 до +19,5 ‰. Если месторождение Юбилейное в Золотушинском районе демонстрирует относительную гомогенность со средними значениями около +3,2 ‰ для пирита, что указывает на доминирование магматогенного источника, то такие объекты, как Корбалихинское или Зареченское, отличаются экстремальным разбросом данных. На Корбалихинском месторождении $\delta^{34}\text{S}$ варьирует от -12,25 до +7 ‰, причем пирит систематически обогащен тяжелым изотопом относительно сфалерита и халькопирита, что может быть следствием фракционирования в ходе последовательной кристаллизации. Зареченское месторождение примечательно резким контрастом между отрицательными значениями в сульфидах (пирит до -3,8, а галенит до -7,5 ‰) и аномально высокими положительными значениями в барите (до +19,5 ‰), что является классическим индикатором смешения биогенной (легкой) серы сульфидов и морской (тяжелой) серы сульфатов в гидро-

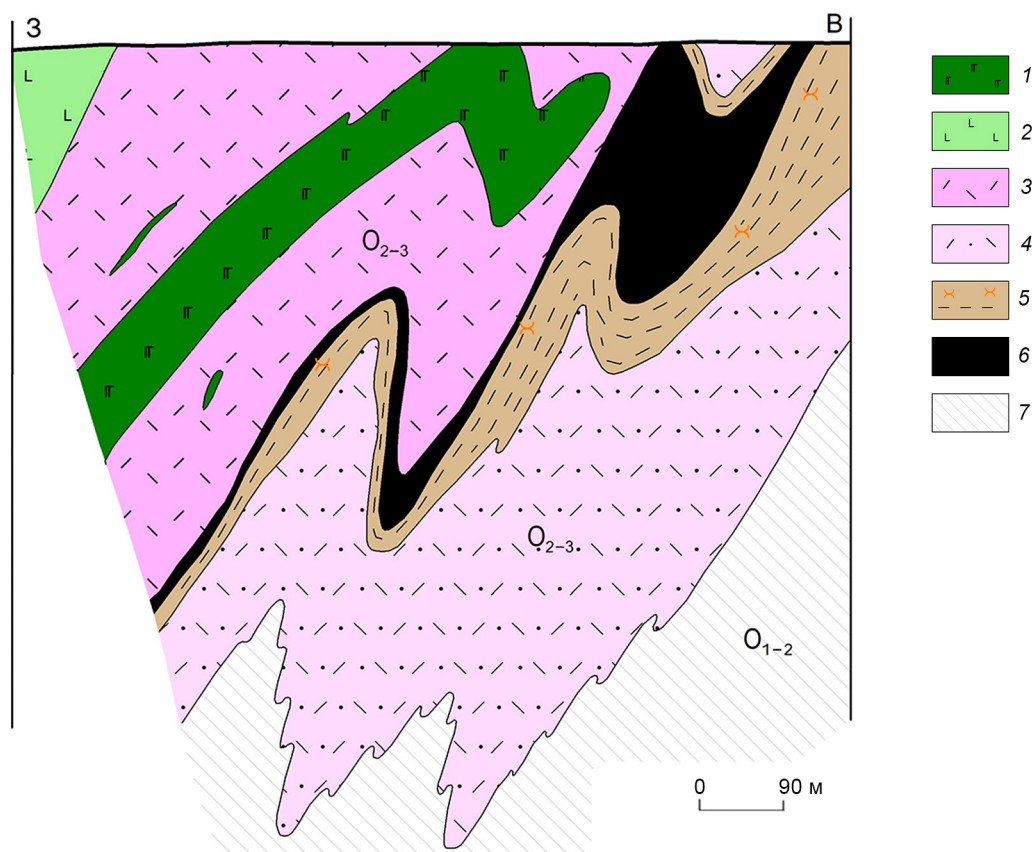


Рис. 12. Литолого-фациальный разрез месторождения Брансуик № 6, с использованием материалов [44]:

1 – габбро-долериты; 2 – лавы и туфы базальтового состава; 3 – риолиты афировые и крупновкрапленные; 4 – чередование риолитов, лав и туфов риолитового состава; 5 – чередование туфов и туффитов риолитового состава; 6 – алевролиты хлоритизированные; 7 – колчеданно-полиметаллические руды (с железом); 8 – нижележащие породы: сланцы, песчаники

термально-осадочной системе. Месторождения казахстанской части (Прииртышский, Лениногорский, Зыряновский районы) в целом подтверждают эту тенденцию к вариабельности: для Лениногорского района (Риддер-Сокольное, Новолениногорское) зафиксированы значения от -12,5 до +8,5 ‰ в сульфидах и до +22,25 ‰ в баритах, а для Малеевского месторождения отмечен разброс от -1,75 до +8,75 ‰ в зависимости от типа руд и геологической позиции. Особняком стоят данные по китайской части Алтая, где в районе Ашеле наблюдается диапазон от -3,7 (галенит) до +8,5 ‰ (пирит), а в районе Келан зафиксированы уникально низкие отрицательные значения до -28,17 ‰ на месторождении Темирт, что однозначно свидетельствует о масштабном влиянии процессов бактериальной сульфатредукции.

Принципиально иная, но не менее контрастная картина наблюдается на месторождениях Иберийского пиритового пояса. Здесь, в отличие от большинства колчеданных провинций мира, абсолютно доминируют отрицательные и околонулевые значения $\delta^{34}\text{S}$. Детальные исследования выявили четкий текстурный контроль изотопного состава. Первичные диагенетические текстуры (фрамбоидальный, колломорфный пирит) характеризуются значениями от -26 до -2 ‰, что является прямым следствием бактериального восстановления сульфатов морской воды в условиях дефицита кислорода на палеодне. В то же время сульфиды прожилково-вкрапленных руд зон подводящих каналов и вторичные, более раскристаллизованные, разности демонстрируют утяжеленный состав, достигающий +10 ‰, но с медиан-

Таблица. Изотопный состав серы сульфидных и сульфатных минералов месторождений типа VMS Алтае-Саянской металлогенической провинции (Рудноалтайская, Салаирская и Улугуйская зоны), Иберийского пиритового пояса (Испания, Португалия) и Батерст (Канада)*

Минерал	Месторождение	Число анализов	Среднее значение	Минимум	Максимум
Алтае-Саянская металлогеническая провинция					
Рудноалтайская металлогеническая зона					
Сульфиды	Ашеле	210	3,5	-13,5	7,7
То же	Белоусовское	18	2,3	-5,5	5,5
«-»	Вуласигу	29	2,5	-1,9	4,2
«-»	Греховское-2	10	3,7	2,4	5,1
«-»	Зареченское	48	-2,1	-7,5	6,4
«-»	Западно-Захаровское	46	4,5	-5,8	13,4
«-»	Захаровское	20	2,5	-1,3	5,2
«-»	Змеиновское	4	-1,12	-1,8	0
«-»	Зыряновское	50	2,6	0,1	5,5
«-»	Иртышское	11	5,1	2,5	6,5
«-»	Кекетале	86	-8,7	-15,3	4,5
«-»	Кейнбулейк	60	1,7	0,8	3,4
«-»	Корбалихинское	150	2,8	-12,3	29,5
«-»	Кьяксия	20	-5,3	-14,2	0,7
«-»	Малеевское	128	3,4	-1,8	8,3
«-»	Новолениновское	144	1,7	-10,3	9,8
«-»	Риддер-Сокольное	170	0,1	-12,5	8,5
«-»	Снегиревское	20	4,4	2,2	5,2
«-»	Старковское	56	2,2	-5,0	5,0
«-»	Стрижковское	12	-1,6	-4,4	4,6
«-»	Талате	27	1,9	-11,7	2,4
«-»	Темирт	57	-18,9	-28,2	2,2
«-»	Тишинское	125	1,8	-1,5	5,5
«-»	Юбилейное	35	2,7	-0,6	5,6
Барит		58	18,9	4,9	24,5
Салаирская металлогеническая зона					
Сульфиды	Салаирское	5	5,3	2,3	7,2
Улугуйская металлогеническая зона					
Сульфиды	Дальнее	27	10,9	4,0	22
«-»	Кызыл-Таштыгское	57	6,4	-1,0	11,0
Барит		9	33,0	25,0	38,7
Иберийский пиритовый пояс					
Сульфиды	Агуас Тенидас	16	0,3	-5,6	3,6
То же	Альджуштрел	41	-1,7	-20,4	4,0
«-»	Асналькольяр	44	-0,5	-8,1	5,6
«-»	Консепсьен	33	4,1	-15,1	10,1
«-»	Ла Сарса	32	0,8	-7,3	7,8
«-»	Ломеро Поватос	8	2,7	-0,1	3,9
«-»	Луиссаль	15	-2,0	-8,3	5,5
«-»	Монте Ромео	11	6,6	3,3	9,0
«-»	Невес-Корво	51	1,1	-11,1	6,0
«-»	Рио Тинто	121	4,3	-14,1	12,4
«-»	Сан Мигель	13	2,1	-3,9	9,2
«-»	Сан Тельмо	14	3,0	0,5	4,9
«-»	Сотил-Миголлас	35	-4,7	-34,2	6,7
«-»	Тарсис	100	-5,0	-26,5	3,5
Барит		9	18,2	14,9	24,0

Окончание таблицы

Минерал	Месторождение	Число анализов	Среднее значение	Минимум	Максимум
Район Батерст					
Сульфиды	Брансуик № 12	130	15,0	11,0	21,0
То же	Брансуик № 6	12	9,0	4,5	17,5
«-»	Карибу	8	10,0	5,0	14,0
«-»	Стратмат	45	16,0	14,0	20,0
«-»	Хит Стилл	90	5,8	-1,0	12,0
Барит		40	28,6	24,5	35,0

Примечание. *использованы материалы: [1, 2, 6, 8, 9, 12, 14, 16–18, 24, 25, 30, 32, 34, 37, 38, 40, 46, 49, 51–55, 57, 59, 60–63].

ными значениями около +3...+5 ‰. Это указывает на существование второго, гидротермального источника серы, образованного путём неорганического восстановления морского сульфата в недрах конвективной системы. Таким образом, для Иберийского пояса устанавливается двойственная природа серы: бактериальная, доминирующая в стратиформных залежах, и гидротермальная, преобладающая в корневых зонах. При этом в регионе отчётливо проявлена латеральная зональность: в юго-западной части пояса (например, месторождение Тарсис, среднее -5,0 ‰) сильнее влияние биогенного источника, тогда как в северо-восточной (Консепсьон, среднее +4,1 ‰) возрастает роль гидротермальной составляющей. Редкий барит Иберийского пояса имеет гомогенный состав около +18 ‰, соответствующий сульфату нижнекаменноугольной морской воды.

Совершенно особое положение занимают объекты в рудном районе Батерст. Изотопный состав серы руд гигантского месторождения Брансуик № 12 характеризуется аномально высокими положительными значениями $\delta^{34}\text{S}$, достигающими в среднем +15 ‰ (при общем диапазоне от +11,0 до +18,5 ‰) для пластовых руд и от +13,8 до +21,0 ‰ для пиритов из подстилающих углеродистых сланцев. Подобные величины значительно превосходят значения, типичные для современных гидротермальных систем срединно-океанических хребтов (+4...+5 ‰) и даже для многих древних аналогов. Столь сильное утяжеление серы интерпретируется как результат формирования месторождения в обстановке устойчиво стратифицированного аноксического бассейна с ограниченным водообменом.

Сравнительный анализ показывает, что, несмотря на общую принадлежность к классу колчеданно-полиметаллических месторождений, рас-

смотренные провинции демонстрируют контрастные изотопно-геохимические характеристики. Улугуйская и Салаирская зоны, а также значительная часть месторождений Рудного Алтая тяготеют к умеренно-положительным значениям $\delta^{34}\text{S}$ (+3...+9 ‰), что типично для систем с доминирующим вкладом серы, восстановленной из морского сульфата в высокотемпературных гидротермальных ячейках при ограниченном влиянии открытых биогенных процессов. Иберийский пиритовый пояс и отчасти китайский Алтай (район Келан) выделяются широким развитием резко отрицательных значений $\delta^{34}\text{S}$, что свидетельствует о значительной роли приповерхностной бактериальной сульфатредукции в обогащении руд лёгким изотопом серы, то есть о более тесной связи с седиментогенезом. Район Батерст, напротив, уникален своим экстремально тяжёлым составом серы, обусловленным фракционированием в условиях застойного аноксического бассейна с высокой степенью восстановления сульфатного резервуара. Эти различия отражают эволюцию окислительно-восстановительной обстановки в палеобассейнах, степень их изолированности и соотношение эндогенных (гидротермальных) и экзогенных (биогенных, седиментационных) факторов в процессе формирования крупных и уникальных колчеданных месторождений палеозоя.

Обсуждение результатов. Проведённое сравнение геологических, структурно-вещественных, минералогических и изотопно-геохимических характеристик колчеданно-полиметаллических месторождений Алтае-Саянской провинции, Иберийского пиритового пояса и района Батерст позволяет выделить как универсальные черты колчеданно-полиметаллического рудообразования, так и региональные особенности. Важно подчеркнуть, что сопоставляемые провинции разновоз-

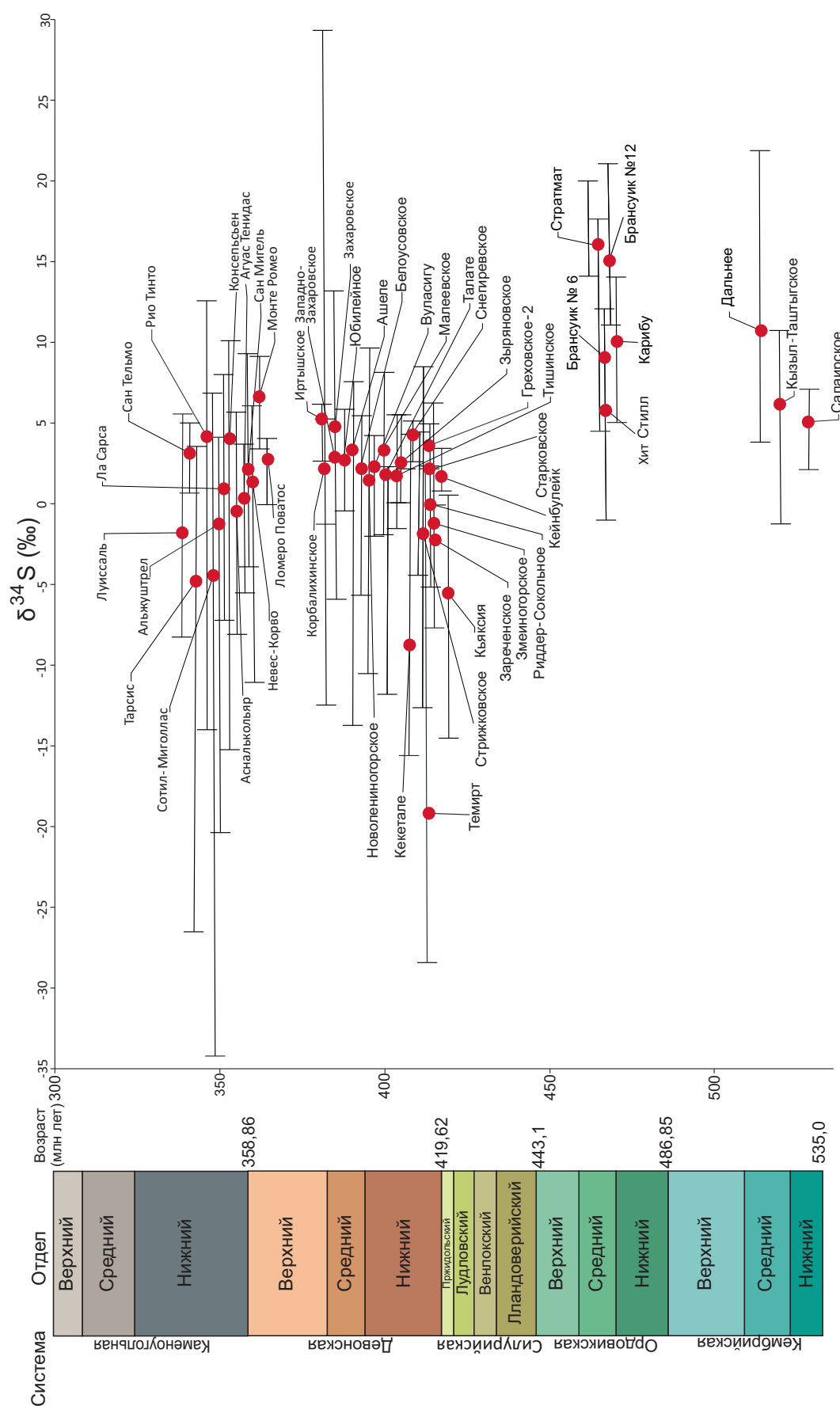


Рис. 13. Среднее значение (красный маркер) и диапазон значений изотопного состава серы сульфидных минералов месторождений типа VMS Алтае-Саянской металлогенической провинции (Рудноалтайская, Салаирская и Улугойская зоны), Иберийского пиритового пояса (Испания, Португалия) и района Батерст (Канада), с использованием материалов [1, 2, 6, 8, 9, 12, 14, 16–18, 24, 25, 30, 32, 34, 37, 38, 40, 46, 49, 51–55, 57, 59–63]

растны: Рудноалтайская зона связана с девонскими комплексами, Салаирская и Улугойская – с нижнекембрийскими, Иберийский пиритовый пояс – с отложениями от позднего девона до среднего карбона, район Батерст – с ордовикскими толщами. Сходство рудоконтролирующих обстановок при столь широком возрастном диапазоне указывает на устойчивую воспроизводимость механизмов VMS-рудообразования в палеозойских палеобассейнах.

Общими чертами являются бимодальный состав вулканогенно-осадочных комплексов с резким преобладанием кислых и основных пород при подчинённой роли средних, субмаринный характер вулканизма, широкое развитие туфов, гиадокластитов, чёрных сланцев, кремнистых и углеродистых пород, а также наличие экранирующих горизонтов. Во всех провинциях выделяются проксимальные и дистальные структурно-вещественные обстановки, определяющие морфологию и масштабы рудных залежей. Минеральные типы руд также обнаруживают значительное сходство: доминируют пирит, сфалерит, галенит и халькопирит, проявлена зональность от нижних медно-колчеданных к верхним цинково-свинцовым рудам.

Различия в литологическом составе и минеральных типах руд обусловлены региональными особенностями строения палеобассейнов. В Рудноалтайской зоне одни районы характеризуются преобладанием вулканических пород, другие – вулканогенно-осадочных и терригенных; в китайской части широко развиты карбонатные породы. Салаирская зона отличается существенно натриевыми дацитами и риолитами при подчинённой роли основных пород. Улугойская зона имеет сложный набор жерловых и удалённых фаций, а также субвулканических интрузий кислого и основного состава. В Иберийском пиритовом поясе вулканы бимодальны при отсутствии средних разностей, а минеральные типы контролируются составом вмещающих пород. В районе Батерст разрез сложен преимущественно риолитовыми лавами, туфами и гиадокластитами с горизонтом железистых кварцитов.

Минеральные типы также варьируют: Рудноалтайская зона выделяется высокими концентрациями Au и Ag, Салаирская – золото-серебросодержащими барит-полиметаллическими и медно-колчеданными рудами, Улугойская – наибольшим разнообразием типов и редкими минерала-

ми, Иберийский пояс – существенно пиритовыми рудами южной зоны и Cu-Zn-Pb рудами северной, район Батерст – классической вертикальной зональностью.

Наиболее контрастные различия связаны с изотопным составом серы. Алтае-Саянская провинция в целом тяготеет к умеренно положительным значениям $\delta^{34}\text{S}$, что типично для систем с преобладанием гидротермального восстановления морского сульфата в закрытых конвективных ячейках; локально проявлены и отрицательные значения, указывающие на бактериальную сульфатредукцию. Иберийский пиритовый пояс отличается широким развитием отрицательных $\delta^{34}\text{S}$, что свидетельствует о доминировании бактериального восстановления сульфата в придонных аноксических условиях, при сосуществовании биогенного и гидротермального источников серы. Район Батерст занимает особое положение: экстремально тяжёлый изотопный состав серы отражает формирование руд в застойном стратифицированном аноксическом бассейне с высокой степенью восстановления сульфатного резервуара.

Таким образом, при общности вещественного состава вмещающих пород, структурного контроля и минеральных типов руд рассмотренные провинции различаются прежде всего изотопно-геохимическими характеристиками, отражающими степень изолированности палеобассейнов, окислительно-восстановительные условия и соотношение эндогенных и экзогенных факторов рудообразования. Разновозрастность провинций не нарушает общей модели: ключевыми факторами остаются бимодальный субмаринный вулканизм, гидротермальная конвекция, наличие экранирующих горизонтов и восстановительные условия в придонных частях палеобассейнов.

Закключение. 1. Рудовмещающие вулканогенно-осадочные комплексы рассмотренных VMS-провинций имеют бимодальный состав (преобладание кислых и основных пород при подчинённом значении средних) и формировались в обстановках рифтогенного типа. Структурно-вещественные обстановки едины для всех зон: выделяют проксимальные (экструзивные купола, жерловые и околожерловые фации) и дистальные (придонные депрессии, удалённые от вулканических центров) типы, что определяет масштабы, морфологию и внутреннее строение рудных залежей. Важную роль играют экранирующие горизонты (карбонатные, туфогенно-осадочные, углероди-

стые породы), контролирующие латеральное течение гидротерм.

2. Минеральные типы руд закономерно эволюционируют от медно-колчеданных к цинково-свинцовым. Месторождения обогащены золотом, серебром, оловом, железом, кадмием, таллием, германием, селеном, теллуром, индием, галлием и висмутом.

3. Сравнение металлогенических провинций показало, что при сходстве вулканогенно-осадочного контроля, бимодального состава вулканитов, типов гидротермальных изменений (кварц-серицитовые, хлоритовые, пропилитовые) и морфологии рудных тел ключевые различия связаны с изотопным составом серы, отражающим разные палеообстановки: гидротермальное восстановление сульфата в закрытых конвективных системах (Алтае-Саянская провинция, северная зона ИПП), бактериальная сульфатредукция в открытых бассейнах (южная зона ИПП, рудные районы Келан и Майзи Рудноалтайской зоны) или в изолированных анокисических бассейнах с высокой степенью восстановления сульфата (рай-

он Батерст). Эти различия определяются степенью изолированности палеобассейнов, интенсивностью гидротермального прогрева и ролью биогенных процессов.

4. Полученные результаты могут быть использованы при металлогеническом прогнозировании и поиске новых VMS-объектов в сходных геодинамических обстановках. Изотопный состав серы выступает в качестве инструмента для реконструкции палеообстановок (окислительно-восстановительных условий, степени замкнутости бассейна) и типизации рудных объектов, что позволяет снизить риски при оценке рудоносности перспективных площадей.

5. Дальнейшие исследования целесообразно направить на более детальное изучение изотопно-геохимических систем (S, Pb, O, H) в разных типах руд и вмещающих пород. Особого внимания заслуживает сравнительный анализ благородно-металльной минерализации (золота и серебра) в разных провинциях, который может дать ключ к пониманию условий формирования руд с высокими содержаниями полезных компонентов.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Авдонин В. В., Воинков Д. М., Гриненко Л. Н., Дёмин Ю. И. Изотопный состав серы сульфидов различных групп месторождений Лениногорского района (Рудный Алтай) // Геология рудных месторождений. – 1972. – № 14(3). – С. 31–44.
2. Аксенов В. С., Гриненко Л. Н., Гриненко В. А. Изотопы серы и вопросы генезиса сульфидных руд полиметаллических месторождений Зырянского района // Проблемы генезиса колчеданно-полиметаллических месторождений Рудного Алтая / Под ред. Абдулина А. А. – Алма-Ата : Наука, 1977. – С. 153–158.
3. Ан В. П. Отчет о геологических работах Урской геологоразведочной партии на Урском рудном поле за 1957–58 гг. – Новокузнецк : 1958.
4. Берман Б. И. Геология и генезис полиметаллических месторождений Кызыл-Таштыгского рудного поля (Восточная Тува) : автореф. дис. на соискание учён. степ. канд. геол.-минерал. наук. – М. : 1966. – 20 с.
5. Берман Б. И. Геология Кызыл-Таштыгского месторождения // Труды Регионального совещания по развитию производительных сил Тувинской АО. – Новосибирск : СО АН СССР, 1960. – С. 137–146.
6. Бестемьянова К. В. Минеральный состав, возраст и генезис барит-полиметаллических месторождений Змеиногорского рудного района (Рудный Алтай) : специальность 1.6.10 «Геология, поиски и разведка твёрдых полезных ископаемых, минералогия» : дис. на соискание учён. степ. канд. геол.-минерал. наук / Ксения Викторовна Бестемьянова. – Томск, 2025. – 255 с.
7. Буслов М. М. [и др.] Тектоника и геодинамика Алтае-Саянской складчатой области // Геология и геофизика. – 2013. – Т. 54, № 10. – С. 1600–1627.
8. Викентьев И. В. Условия формирования и метаморфизм колчеданных руд. – М. : Научный мир, 2004. – 340 с.
9. Гаськов И. В. Колчеданно-полиметаллические месторождения северо-западной части Рудного Алтая: условия образования и закономерности размещения : специальность 25.00.11 «Геология, поиски и разведка твердых полезных ископаемых, минералогия» : дис. на соискание учён. степ. докт. геол.-минерал. наук / Иван Васильевич Гаськов. – Новосибирск, 2002. – 336 с.
10. Гаськов И. В. Кызыл-Таштыгское месторождение в Восточной Туве – эталон древнего вулканогенного образования колчеданно-полиметаллических руд // Геология и геофизика. – 2020. – Т. 61, № 2. – С. 175–193.

11. Гаськов И. В. Особенности развития колчеданных рудно-магматических систем в островодужных обстановках Рудного Алтая и Южного Урала // Литосфера. – 2015. – № 2. – С. 17–39.
12. Гриненко В. А., Гриненко Л. Н. Геохимия изотопов серы. – М. : Наука, 1974. – 274 с.
13. 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.
14. Заири Н. М., Кузнецов В. В., Филатов Е. И., Гурина Н. В. Опыт использования данных по изотопному составу серы при реконструкции условий формирования руд Корбалихинского месторождения (Рудный Алтай) // Геохимия. – 1986. – № 7. – С. 997–1005.
15. Зайков В. В. Вулканизм и сульфидные холмы палеоокеанических окраин. – М. : Наука, 2006. – 426 с.
16. Инякин А. В. Условия локализации золото-серебро-полиметаллического оруденения Салаирско-Каменушинского рудного поля, Салаирский кряж : специальность 25.00.11 «Геология, поиски и разведка твёрдых полезных ископаемых, минерагения» : дис. на соискание учён. степ. канд. геол.-минерал. наук / Алексей Валерьевич Инякин. – М. : 2020. – 164 с.
17. Ковалев К. Р., Гаськов И. В., Перцева А. П. Изотопный состав серы колчеданно-полиметаллических руд месторождений азиатской части России // Геология рудных месторождений. – 2000. – Т. 42, № 2. – С. 83–112.
18. Кузбный В. С., Дистанов Э. Г., Макаров В. А., Калеев В. А. Изотопный состав серы колчеданно-полиметаллических руд Кызыл-Таштыгского рудного поля // Изотопные исследования процессов рудообразования. – Новосибирск : Наука, 1991. – С. 30–40.
19. Кузнецов В. В., Галямов А. Л., Кудрявцева Н. Г. Отчет по Гос. контракту № 64-Ф по объекту «Опережающие геолого-геофизические работы для обоснования переоценки перспектив полиметаллического оруденения Рудного Алтая (Алтайский край) с целью разработки основы для создания ведущего в Российской Федерации центра по добыче свинца и цинка». – М. : 2012. – 754 л.
20. Кузнецов В. В., Кудрявцева Н. Г., Серавина Т. В., Мурзин О. В., Корчагина Д. А., Кузнецова С. В., Миляев С. А. Основы прогноза и поисков колчеданно-полиметаллических месторождений Рудного Алтая. – М. : ЦНИГРИ, 2019. – 206 с.
21. Кузнецов В. В., Кузнецова Т. П., Серавина Т. В. Научно-методические основы прогноза и поисков полиметаллических месторождений Алтае-Саянской минерагенической провинции // Материалы VII научно-практической конференции «Научно-методические основы прогноза, поисков и оценки месторождений благородных и цветных металлов – состояние и перспективы». – М. : ЦНИГРИ, 2017. – С. 34–35.
22. Кузнецов В. В., Серавина Т. В., Корчагина Д. А. Минерально-сырьевая база и обстановки локализации полиметаллических месторождений Сибири // Руды и металлы. – 2017. – № 1. – С. 19–32.
23. Кузнецов В. В., Серавина Т. В., Кузнецова С. В., Елишина С. Л. Условия локализации колчеданно-полиметаллического оруденения Улугуйской минерагенической зоны (Республика Тыва) // Отечественная геология. – 2020. – № 3. – С. 3–17.
24. Кузнецова С. В. Структурно-текстурные признаки гидротермально-осадочного происхождения руд колчеданно-полиметаллических месторождений Змеиногорского и Рубцовского районов Рудного Алтая : специальность 1.6.10 «Геология, поиски и разведка твёрдых полезных ископаемых, минерагения» : дис. на соискание учён. степ. канд. геол.-минерал. наук / Светлана Владимировна Кузнецова. – М. : 2023. – 171 с.
25. Лапухов А. С., Доильнищын Е. Ф., Каньгин А. А., Карманов В. П., Кудряшов А. М. О полигенности рудноалтайских колчеданно-полиметаллических месторождений по данным изотопного состава серы // Изотопные исследования процессов рудообразования. – Новосибирск : Наука, 1991. – С. 41–56.
26. Серавина Т. В. Некоторые особенности формирования колчеданно-полиметаллических месторождений типа VMS Большого Алтая // Отечественная геология. – 2025. – № 5. – С. 16–45.
27. Серавина Т. В. Положение колчеданно-полиметаллических месторождений Сибири в вулканогенном разрезе (на примере Рудноалтайской, Салаирской, Кызылташтыгской и Приаргунской минерагенических зон) // Материалы XXIV молодёжной научной школы «Металлогения древних и современных океанов – 2018. Вулканизм и рудообразование». – Миасс, 2018. – С. 104–108.
28. Серавина Т. В., Инякин А. В., Кузнецов В. В., Мурзин О. В., Зяятдинов М. Р., Конкина А. А., Кудрявцева Н. Г. Особенности и условия накопления вулканогенно-осадочных отложений нижнего кембрия (Салаирский кряж) // Отечественная геология. – 2017. – № 2. – С. 22–30.
29. Серавина Т. В., Кудрявцева Н. Г., Кузнецов В. В. Отчет по договору № 37 от 28.09.2015 г. «Специализированные геолого-геохимические работы для оценки перспектив колчеданно-полиметаллического с золотом оруденения основных рудных районов и узлов Салаирской металлогенической зоны». – М. : ЦНИГРИ, 2017. – 216 с.
30. Серавина Т. В., Кузнецов В. В., Кряжев С. Г. Информационный геологический отчет о результа-

тах и объёмах работ, выполненных за 2025 г. по объекту «Изучение вещественного состава рудовмещающих пород, околорудных метасоматитов, медно-свинцово-цинковой (с попутным золотом и серебром) минерализации Западно-Захаровской площади (Алтайский край)» (Договор № ВВ-2/24 от 14.06.2024 г.). – М. : 2025. – 119 с.

31. Симонов В. А., Масленников В. В., Котляров А. В. Условия минералообразующих процессов в кислых магматических системах, связанных с формированием колчеданных месторождений Урала и Алтае-Саянской области // *Минералогия*. – 2021. – № 7(4). – С. 5–32.
32. Юдовская М. А., Гриненко Л. Н., Еремин Н. И. Генезис Малеевского колчеданно-полиметаллического месторождения (Рудный Алтай, Казахстан) // *Геология рудных месторождений*. – 1997. – Т. 39, № 2. – С. 163–182.
33. Albardeiro L., Matos J. X., Mendes M., Solá R., Pereira Z., Morais I., Salgueiro R., Pacheco N., Araújo V., Oliveira J. T. Geological correlation of Neves-Corvo Mine and Pomarão Antiform sequences (Iberian Pyrite Belt, Portugal) // *Comunicações Geológicas*. – 2020. – № 107, Especial III. – P. 111–132.
34. Bian C. J., Xu J. H., Chen D. P., Zhang H., Cheng X. H. A fluid inclusion study of vein-type copper mineralization in the east Wulasigou Pb–Zn–Cu deposit, Altay, northwestern China // *Acta Geol. Sin. (ENGL)*. – 2016. – № 90(5). – P. 1754–1767.
35. Díez-Montes A. Lithogeochemistry of volcanic rocks in the Rio-Tinto mine, Iberian Pyrite Belt (Huelva, Spain). – Madrid : Instituto Geológico y Minero de España, 2017. – 54 p.
36. Gaspar O. C. Mineralogy and sulfide mineral chemistry of Neves-Corvo ores, Portugal: insight into their genesis // *The Canadian Mineralogist*. – 2002. – Vol. 40. – P. 611–636.
37. Geng X. X., Yang F. Q., Yang J. M., Guo Z. L., Guo X. J., Huang C. K., Liu F., Chai F. M., Zhang Z. X. Stable isotope characteristics of Tiemurte Pb–Zn deposit in Altay, Xinjiang // *Mineral Deposits*. – 2010. – № 29. – P. 1088–1100.
38. Goodfellow W. D. Metallogeny of the Bathurst Mining Camp, northern New Brunswick // *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. 449–469.
39. Goodfellow W. D., McCutcheon S. R., Peter J. M. Massive sulfide deposits of the Bathurst mining camp, New Brunswick, and northern Maine // *Economic Geology Monograph*. – 2003. – 930 p.
40. Goodfellow W. D., Peter J. M. Sulphur isotope composition of the Brunswick No. 12 Massive sulphide deposit, Bathurst Mining Camp, New Brunswick: Implications for ambient environment, sulphur source, and ore genesis // *Canadian Journal of Earth Sciences*. – 1996. – Vol. 33. – P. 231–251.
41. Lentz D. R. Deformation-induced mass transfer in felsic volcanic rocks hosting the Brunswick No. 6 massive-sulfide deposit, New Brunswick: Geochemical effects and petrogenetic implications // *The Canadian Mineralogist*. – 1999. – Vol. 37. – P. 489–512.
42. Lentz D. R. Recent advances in lithogeochemical exploration for massive-sulphide deposits in volcano-sedimentary environments: petrogenetic, chemostratigraphic, and alteration aspects with examples from the Bathurst Camp, New Brunswick // *Current Research / New Brunswick Energy & Mines Division*. – New Brunswick Department of Natural Resources, 1996. – P. 73–119.
43. Lentz D. R., Goodfellow W. D. Mineralogy and petrology of the stringer sulphide zone in the discovery hole at Brunswick No. 12 massive sulphide deposit, Bathurst, New Brunswick // *Paper 93-1E / Geological Survey of Canada*. – Ottawa, 1993. – P. 248–258.
44. Lentz D. R., McCutcheon S. R. The Brunswick No. 6 massive sulfide deposit, Bathurst Mining Camp, northern New Brunswick, Canada: a synopsis of the geology and hydrothermal alteration system // *Exploration and Mining Geology*. – 2006. – Vol. 15, № 3–4. – P. 123–156.
45. Leistel J. M., Marcoux E., Thieblemont D., Quesada C., Sánchez A., Almodóvar G. R., Pascual E., Sáez R. The volcanic-hosted massive sulphide deposits of the Iberian Pyrite Belt: review and preface to the thematic issue // *Mineralium Deposita*. – 1998. – Vol. 33. – P. 2–30.
46. Li D.-F., Chen H.-Y., Hollings P., Li Z., Sun X.-M., Zheng Y., Xia X.-P., Xiao B., Wang C.-M., Fang J. Trace element geochemistry of magnetite: implications for ore genesis of the Talate skarn Pb–Zn (–Fe) deposit, Altay, NW China // *Ore Geology Reviews*. – 2018. – Vol. 100. – P. 471–482.
47. Newall P., Hill A., Ellis R., King P., Holley S. NI 43-101 Technical report for the Neves-Corvo mine, Portugal. – Lundin Mining, 2017. – 236 p.
48. Relvas J., Barriga F., Ferreira A., Noiva P., Pacheco N., Barriga F. Hydrothermal alteration and mineralization in the Neves-Corvo volcanic hosted massive sulphide deposit, Portugal. I. Geology, mineralogy, and geochemistry // *Economic Geology*. – 2006. – Vol. 101. – P. 753–790.
49. Sun C., Zhang H., Yang X., Ji W., Chen B., Li Y., Dong Z., Faisal M. A tale of elemental accumulation and recycling in the metamorphosed Keketale VMS-type Pb–Zn deposit, Altai Mountains // *Geoscience Frontiers*. – 2023. – Vol. 14, Is. 1. – P. 101481.
50. Tornos F., Locutura J., Martins L. The Iberian Pyrite Belt field trip guide. Joint SGA-IAGOD International Meeting, Field trip B4. – 1999.

51. Velasco F., Sánchez-España J., Boyce A. J., Fallick A. E., Sáez R., Almodóvar G. R. A new sulphur isotopic study of some Iberian Pyrite Belt deposits: evidence of a textural control on sulphur isotope composition // *Mineralium Deposita*. – 1998. – Vol. 34. – P. 4–18.
52. Wan B., Zhang L. C., Xiang P. The Ashele VMS-type Cu-Zn deposit in Xinjiang, NW China formed in a rifted arc setting // *Resource Geology*. – 2010. – Vol. 60, № 2. – P. 150–164.
53. 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. – Vol. 37, № 2. – P. 114–126.
54. Wang D. H., Chen Y. C., Mao J. W. The Ashele deposit: a recently discovered volcanogenic massive sulfide Cu-Zn deposit in Xinjiang, China // *Resource Geology*. – 1998. – Vol. 48, № 1. – P. 31–42.
55. Wang J. B., Qin K. Z., Wu Z. L., Hu J. H., Deng J. N. Volcanic-exhalative-sedimentary lead zinc deposit in the southern margin of the Altai, Xinjiang. – Beijing : Geology Publishing House, 1998. – P. 1–210.
56. Wilhem C., Windley B. F., Stampfli G. M. The Ataiids of Central Asia: a tectonic and evolutionary innovative review // *Earth-Science Reviews*. – 2012. – Vol. 113.
57. 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. – Vol. 222.
58. Yang F., Li Q., Yang C. D., Zhang Z. A combined fluid inclusion and S-H-O-He-Ar isotope study of the Devonian Ashele VMS-type copper-zinc deposit in the Altay orogenic belt, northwest China // *Journal of Asian Earth Sciences*. – 2018. – Vol. 161. – P. 139–163.
59. 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. – Vol. 144.
60. 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. – Vol. 167.
61. 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. – Vol. 72. – P. 65–82.
62. Yuan L., Liu F. Sulfide Re-Os age and Rb-Sr age of Talate Pb-Zn-Fe polymetallic deposit in Southern Altay and their geological significance // *Mineral Deposit*. – 2017. – Vol. 36. – P. 1333–1351.
63. Zhang W., Zhang X., Liu G., Guo X. Magmatic-seawater interaction in the Keyinbulake Zn-Cu deposit (NW China): insight from sulfide S isotope and trace elements // *Ore Geol. Rev.* – 2026. – Vol. 188.

REFERENCES

1. Avdonin V. V., Voinkov D. M., Grinenko L. N., Domin Yu. I. Izotopnyy sostav sery sul'fidov razlichnykh grupp mestorozhdeniy Leninogorskogo rayona (Rudnyy Altay) [Isotopic composition of sulfur of sulfides of different groups of deposits in the Leninogorsk region (Rudny Altay)], *Geologiya rudnykh mestorozhdeniy*, 1972, No. 14(3), pp. 31–44. (In Russ.)
2. Aksenov V. S., Grinenko L. N., Grinenko V. A. Izotopy sery i voprosy genezisa sul'fidnykh rud polimetallicheskikh mestorozhdeniy Zyryanovskogo rayona [Sulfur isotopes and questions of genesis of sulfide ores of polymetallic deposits of Zyryanovsky district], *Problemy genezisa kolchedanno-polimetallicheskikh mestorozhdeniy Rudnogo Altaya*, ed. Abdulin A. A., Alma-Ata, Nauka publ., 1977, pp. 153–158. (In Russ.)
3. An V. P. Otchet o geologicheskikh rabotakh Urskoy geologorazvedochnoy partii na Urskom rudnom pole za 1957–58 gg. [Report on geological works of the Ur geological exploration party on the Ur ore field for 1957–58], Novokuznetsk, 1958. (In Russ.)
4. Berman B. I. Geologiya i genezis polimetallicheskikh mestorozhdeniy Kyzyl-Tashtygskogo rudnogo polya (Vostochnaya Tuva) [Geology and genesis of polymetallic deposits of the Kyzyl-Tashtyg ore field (Eastern Tuva)], avtoref. dis. na soiskanie uchen. step. kand. geol.-mineral. nauk, Moscow, 1966, 20 p. (In Russ.)
5. Berman B. I. Geologiya Kyzyl-Tashtygskogo mestorozhdeniya [Geology of the Kyzyl-Tashtyg deposit], *Trudy Regional'nogo soveshchaniya po razvitiyu proizvoditel'nykh sil Tuvinskoy AO, Novosibirsk, SO AN SSSR publ.*, 1960, pp. 137–146. (In Russ.)
6. Bestem'yanova K. V. Mineral'nyy sostav, vozrast i genezis barit-polimetallicheskikh mestorozhdeniy Zmeinogorskogo rudnogo rayona (Rudnyy Altay) [Mineral composition, age and genesis of barite-polymetallic deposits of the Zmeinogorsk ore region (Rudny Altay)], *Tomsk*, 2025, 255 p. (In Russ.)

7. *Buslov M. M.* [et al.] Tektonika i geodinamika Alta-ye-Sayanskoy skladchatoy oblasti [Tectonics and geodynamics of the Altai-Sayan folded region], *Geologiya i geofizika*, 2013, V. 54, No. 10, pp. 38–40. (In Russ.)
8. *Vikent'yev I. V.* Usloviya formirovaniya i metamorfizm kolchedannykh rud [Conditions of formation and metamorphism of pyrite ores], Moscow, Nauchnyy mir publ., 2004, 340 p. (In Russ.)
9. *Gas'kov I. V.* Kolchedanno-polimetallicheskiye mestorozhdeniya severo-zapadnoy chasti Rudnogo Alta-ya: usloviya obrazovaniya i zakonomernosti razmeshcheniya [Pyrite-polymetallic deposits of the northwestern part of Rudny Altai: conditions of formation and patterns of placement], Novosibirsk, 2002, 336 p. (In Russ.)
10. *Gas'kov I. V.* Kyzyl-Tashtygskoye mestorozhdeniye v Vostochnoy Tuve – etalon drevnego vulkanogen-nogo obrazovaniya kolchedanno-polimetallicheskih rud [Kyzyl-Tashtyg deposit in Eastern Tuva – a reference model of ancient volcanogenic formation of pyrite-polymetallic ores], *Geologiya i geofizika*, 2020, V. 61, No. 2, pp. 175–193. (In Russ.)
11. *Gas'kov I. V.* Osobennosti razvitiya kolchedannykh rudno-magmaticheskikh sistem v ostrovoduzhnykh obstanovkakh Rudnogo Alta-ya i Yuzhnogo Urala [Features of development of pyrite ore-magmatic systems in island arc settings of Rudny Altai and Southern Urals], *Litosfera*, 2015, No. 2, pp. 17–39. (In Russ.)
12. *Grinenko V. A., Grinenko L. N.* Geokhimiya izotopov sery [Geochemistry of sulfur isotopes], Moscow, Nauka publ., 1974, 274 p. (In Russ.)
13. *Dyachkov B. A., Mizernaya M. A., Pyatkova A. P., Bisatova A. E., Miroshnikova A. P., Kuz'mina O. N., Zimanovskaya N. A., Oytseva T. A., Chernenko Z. I.* K probleme formirovaniya kolchedanno-polimetallicheskih mestorozhdeniy Rudnogo Alta-ya [On the problem of formation of pyrite-polymetallic deposits of Rudny Altai], *Otechestvennaya geologiya*, 2021, No. 5, pp. 3–16. (In Russ.)
14. *Zairi N. M., Kuznetsov V. V., Filatov E. I., Gurina N. V.* Opyt ispol'zovaniya dannykh po izotopnomu sostavu sery pri rekonstruktsii usloviy formirovaniya rud Korbalikhinskogo mestorozhdeniya (Rudnyy Altay) [Experience of using data on the isotopic composition of sulfur in reconstructing the conditions of ore formation at the Korbalikhinskoye deposit (Rudny Altai)], *Geokhimiya*, 1986, No. 7, pp. 997–1005. (In Russ.)
15. *Zaykov V. V.* Vulkanizm i sul'fidnyye kholmy paleookeanicheskikh okrain [Volcanism and sulfide mounds of paleoceanic margins], Moscow, Nauka publ., 2006, 426 p. (In Russ.)
16. *Inyakin A. V.* Usloviya lokalizatsii zoloto-serebro-polimetallicheskogo orudeneniya Salairsko-Kamenushinskogo rudnogo polya, Salairskiy kryazh [Localization conditions of gold-silver-polymetallic mineralization of the Salair-Kamenshinsky ore field, Salair Ridge], Moscow, 2020, 164 p. (In Russ.)
17. *Kovalev K. R., Gas'kov I. V., Pertseva A. P.* Izotopnyy sostav sery kolchedanno-polimetallicheskih rud mestorozhdeniy aziatskoy chasti Rossii [Isotopic composition of sulfur of pyrite-polymetallic ores of deposits of the Asian part of Russia], *Geologiya rudnykh mestorozhdeniy*, 2000, V. 42, No. 2, pp. 83–112. (In Russ.)
18. *Kuzebnyy V. S., Distanov E. G., Makarov V. A., Kaleev V. A.* Izotopnyy sostav sery kolchedanno-polimetallicheskih rud Kyzyl-Tashtygskogo rudnogo polya [Isotopic composition of sulfur of pyrite-polymetallic ores of the Kyzyl-Tashtyg ore field], *Izotopnyye issledovaniya protsessov rudoobrazovaniya*, Novosibirsk, Nauka publ., 1991, pp. 30–40. (In Russ.)
19. *Kuznetsov V. V., Galyamov A. L., Kudryavtseva N. G.* Otchet po Gos. kontraktu No. 64-F po ob'yektu "Ope-rezhayushchiye geologo-geofizicheskiye raboty dlya obosnovaniya pereotsenki perspektiv polimetallicheskogo orudeneniya Rudnogo Alta-ya (Altayskiy kray) s tsel'yu razrabotki osnovy dlya sozdaniya vedushchego v Rossiyskoy Federatsii tsentra po dobyche svintsa i tsinka" [Report on State contract No. 64-F on the project "Advanced geological and geophysical work to substantiate the revaluation of polymetallic mineralization prospects of Rudny Altai (Altai Territory) with the aim of developing a basis for creating the leading center in the Russian Federation for lead and zinc mining"], Moscow, 2012, 754 p. (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 Alta-ya [Fundamentals of forecasting and prospecting for pyrite-polymetallic deposits in Rudny Altai], Moscow, TSNIGRI publ., 2019, 206 p. (In Russ.)
21. *Kuznetsov V. V., Kuznetsova T. P., Seravina T. V.* Nauchno-metodicheskiye osnovy prognoza i poiskov polimetallicheskih mestorozhdeniy Alta-ye-Sayanskoy mineragenicheskoy provintsii [Scientific and methodological foundations of forecasting and prospecting for polymetallic deposits of the Altai-Sayan mineragenic province], *Materialy VII nauchno-prakticheskoy konferentsii "Nauchno-metodicheskiye osnovy prognoza, poiskov i otsenki mestorozhdeniy blagorodnykh i tsvetnykh metallov – sostoyaniye i perspektivy"*, Moscow, 2017, pp. 34–35. (In Russ.)
22. *Kuznetsov V. V., Seravina T. V., Korchagina D. A.* Mineral'no-syr'yevaya baza i obstanovki lokalizatsii polimetallicheskih mestorozhdeniy Sibiri [Mineral resource base and localization settings of polymetallic deposits of Siberia], *Rudy i metally*, 2017, No. 1, pp. 19–32. (In Russ.)
23. *Kuznetsov V. V., Seravina T. V., Kuznetsova S. V., Yelshina S. L.* Usloviya lokalizatsii kolchedanno-po-

- limetallichesкого orudeneniya Ulugoyской mineragenicheskoy zony (Respublika Tyva) [Localization conditions of pyrite-polymetallic mineralization of the Ulugoy mineragenic zone (Republic of Tuva)], *Otechestvennaya geologiya*, 2020, No. 3, pp. 3–17. (In Russ.)
24. *Kuznetsova S. V.* Strukturno-teksturnyye priznaki gidrotermal'no-osadochnogo proiskhozhdeniya rud kolchedanno-polimetallicheskih mestorozhdeniy Zmeinogorskogo i Rubtsovskogo rayonov Rudnogo Altaya [Structural and textural features of hydrothermal-sedimentary origin of ores of pyrite-polymetallic deposits of the Zmeinogorsk and Rubtsovsk regions of Rudny Altai], Moscow, 2023, 171 p. (In Russ.)
25. *Lapukhov A. S., Doil'nitsyn Ye. F., Kanygin A. A., Karmanov V. P., Kudryashov A. M.* O poligennosti rudnoaltayskikh kolchedanno-polimetallicheskih mestorozhdeniy po dannym izotopnogo sostava sery [On the polygenicity of the Ore-Altai pyrite-polymetallic deposits based on the isotopic composition of sulfur], *Izotopnyye issledovaniya protsessov rudobrazovaniya*, Novosibirsk, Nauka publ., 1991, pp. 41–56. (In Russ.)
26. *Seravina T. V.* Nekotoryye osobennosti formirovaniya kolchedanno-polimetallicheskih mestorozhdeniy tipa VMS Bol'shogo Altaya [Some features of the formation of pyrite-polymetallic deposits of the VMS type of the Greater Altai], *Otechestvennaya geologiya*, 2025, No. 5, pp. 16–45. (In Russ.)
27. *Seravina T. V.* Polozheniye kolchedanno-polimetallicheskih mestorozhdeniy Sibiri v vulkanogennom razreze (na primere Rudnoaltayskoy, Salairskoy, Kyzyltashtygskoy i Priargunskoy mineragenicheskikh zon) [Position of pyrite-polymetallic deposits of Siberia in the volcanic section (on the example of the Rudno-Altai, Salair, Kyzyl-Tashtyg and Priargun mineragenic zones)], *Materialy XXIV molodezhnoy nauchnoy shkoly "Metallogeniya drevnikh i sovremennykh okeanov – 2018. Vulkanizm i rudobrazovaniye"*, Miass, 2018, pp. 104–108. (In Russ.)
28. *Seravina T. V., Inyakin A. V., Kuznetsov V. V., Murzin O. V., Zayatinov M. R., Konkina A. A., Kudryavtseva N. G.* Osobennosti i usloviya nakopleniya vulkanogenno-osadochnykh otlozheniy nizhnego kembriya (Salairskiy kryazh) [Features and conditions of accumulation of volcanogenic-sedimentary deposits of the Lower Cambrian (Salair Ridge)], *Otechestvennaya geologiya*, 2017, No. 2, pp. 22–30. (In Russ.)
29. *Seravina T. V., Kudryavtseva N. G., Kuznetsov V. V.* Otchet po dogovoru No. 37 ot 28.09.2015 g. "Spetsializirovannyye geologo-geokhimicheskiye raboty dlya otsenki perspektiv kolchedanno-polimetallichesкого s zolotom orudeneniya osnovnykh rudnykh rayonov i uzlov Salairskoy metallogenicheskoy zony" [Report under agreement No. 37 dated 28.09.2015 "Specialized geological and geochemical work to assess the prospects of pyrite-polymetallic with gold mineralization of the main ore regions and nodes of the Salair metallogenetic zone"], Moscow, TSNIGRI publ., 2017, 216 p. (In Russ.)
30. *Seravina T. V., Kuznetsov V. V., Kryazhev S. G.* Informatsionnyy geologicheskii otchet o rezul'tatakh i ob'yemakh rabot, vypolnennykh za 2025 g. po ob'yektu "Izucheniye veshchestvennogo sostava rudovmeshchayushchikh porod, okolorudnykh metasomatitov, medno-svintsovo-tsinkovoy (s poputnym zolotom i serebrom) mineralizatsii Zapadno-Zakharovskoy ploshchadi (Altayskiy kray)" (Dogovor No. VV-2/24 ot 14.06.2024 g.) [Information geological report on the results and volumes of work performed in 2025 on the project "Study of the material composition of ore-bearing rocks, wallrock metasomatites, copper-lead-zinc (with associated gold and silver) mineralization of the West Zakharovskaya area (Altai Territory)" (Agreement No. VV-2/24 dated 14.06.2024)], Moscow, 2025, 119 p. (In Russ.)
31. *Simonov V. A., Maslennikov V. V., Kotlyarov A. V.* Usloviya mineraloobrazuyushchikh protsessov v kisl'nykh magmaticheskikh sistemakh, svyazannykh s formirovaniyem kolchedannykh mestorozhdeniy Urala i Altaye-Sayanskoy oblasti [Conditions of ore-forming processes in acidic magmatic systems associated with the formation of pyrite deposits of the Urals and Altai-Sayan region], *Mineralogiya*, 2021, No. 7(4), pp. 5–32. (In Russ.)
32. *Yudovskaya M. A., Grinenko L. N., Yeremin N. I.* Genezis Maleyevskogo kolchedanno-polimetallichesкого mestorozhdeniya (Rudnyy Altay, Kazakhstan) [Genesis of the Maleevskoye pyrite-polymetallic deposit (Rudny Altai, Kazakhstan)], *Geologiya rudnykh mestorozhdeniy*, 1997, V. 39, No. 2, pp. 163–182. (In Russ.)
33. *Albardeiro L., Matos J. X., Mendes M., Solá R., Pereira Z., Morais I., Salgueiro R., Pacheco N., Araújo V., Oliveira J. T.* Geological correlation of Neves-Corvo Mine and Pomarão Antiform sequences (Iberian Pyrite Belt, Portugal), *Comunicações Geológicas*, 2020, No. 107, Especial III, pp. 111–132.
34. *Bian C. J., Xu J. H., Chen D. P., Zhang H., Cheng X. H.* A fluid inclusion study of vein-type copper mineralization in the east Wulasigou Pb–Zn–Cu deposit, Altay, northwestern China, *Acta Geol. Sin. (ENGL)*, 2016, No. 90 (5), pp. 1754–1767.
35. *Diez-Montes A.* Lithogeochemistry of volcanic rocks in the Rio-Tinto mine, Iberian Pyrite Belt (Huelva, Spain), Madrid, Instituto Geologico y Minero de Espana, 2017, 54 p.
36. *Gaspar O. C.* Mineralogy and sulfide mineral chemistry of Neves-Corvo ores, Portugal: insight into their genesis, *The Canadian Mineralogist*, 2002, V. 40, pp. 611–636.

37. Geng X. X., Yang F. Q., Yang J. M., Guo Z. L., Guo X. J., Huang C. K., Liu F., Chai F. M., Zhang Z. X. Stable isotope characteristics of Tiemurte Pb-Zn deposit in Altay, Xinjiang, Mineral Deposits, 2010, No. 29, pp. 1088–1100.
38. Goodfellow W. D. Metallogeny of the Bathurst Mining Camp, northern New Brunswick, 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. 449–469.
39. Goodfellow W. D., McCutcheon S. R., Peter J. M. Massive sulfide deposits of the Bathurst mining camp, New Brunswick, and northern Maine, Economic Geology Monograph, 2003, 930 p.
40. Goodfellow W. D., Peter J. M. Sulphur isotope composition of the Brunswick No. 12 Massive sulphide deposit, Bathurst Mining Camp, New Brunswick: Implications for ambient environment, sulphur source, and ore genesis, Canadian Journal of Earth Sciences, 1996, V. 33, pp. 231–251.
41. Lentz D. R. Deformation-induced mass transfer in felsic volcanic rocks hosting the Brunswick No. 6 massive-sulfide deposit, New Brunswick: Geochemical effects and petrogenetic implications, The Canadian Mineralogist, 1999, V. 37, pp. 489–512.
42. Lentz D. R. Recent advances in lithogeochemical exploration for massive-sulphide deposits in volcano-sedimentary environments: petrogenetic, chemo-stratigraphic, and alteration aspects with examples from the Bathurst Camp, New Brunswick, Current Research, New Brunswick Energy & Mines Division, New Brunswick Department of Natural Resources, 1996, pp. 73–119.
43. Lentz D. R., Goodfellow W. D. Mineralogy and petrology of the stringer sulphide zone in the discovery hole at Brunswick No. 12 massive sulphide deposit, Bathurst, New Brunswick, Paper 93-1E, Geological Survey of Canada, Ottawa, 1993, pp. 248–258.
44. Lentz D. R., McCutcheon S. R. The Brunswick No. 6 massive sulfide deposit, Bathurst Mining Camp, northern New Brunswick, Canada: a synopsis of the geology and hydrothermal alteration system, Exploration and Mining Geology, 2006, V. 15, No. 3–4, pp. 123–156.
45. Leistel J. M., Marcoux E., Thieblemont D., Quesada C., Sánchez A., Almodóvar G. R., Pascual E., Sáez R. The volcanic-hosted massive sulphide deposits of the Iberian Pyrite Belt: review and preface to the thematic issue, Mineralium Deposita, 1998, V. 33, pp. 2–30.
46. Li D.-F., Chen H.-Y., Hollings P., Li Z., Sun X.-M., Zheng Y., Xia X.-P., Xiao B., Wang C.-M., Fang J. Trace element geochemistry of magnetite: implications for ore genesis of the Talate skarn Pb-Zn (-Fe) deposit, Altay, NW China, Ore Geol. Rev., 2018, V. 100, pp. 471–482.
47. Newall P., Hill A., Ellis R., King P., Holley S. NI 43-101 Technical report for the Neves-Corvo mine, Portugal, Lundin Mining, 2017, 236 p.
48. Relvas J., Barriga F., Ferreira A., Noiva P., Pacheco N., Barriga F. Hydrothermal alteration and mineralization in the Neves-Corvo volcanic hosted massive sulphide deposit, Portugal. I. Geology, mineralogy, and geochemistry, Economic Geology, 2006, V. 101, pp. 753–790.
49. Sun C., Zhang H., Yang X., Ji W., Chen B., Li Y., Dong Z., Faisal M. A tale of elemental accumulation and recycling in the metamorphosed Keketale VMS-type Pb-Zn deposit, Altai Mountains, Geoscience Frontiers, 2023, V. 14, Is. 1, pp. 101481.
50. Tornos F., Locutura J., Martins L. The Iberian Pyrite Belt field trip guide. Joint SGA-IAGOD International Meeting, Field trip B4, 1999.
51. Velasco F., Sánchez-España J., Boyce A. J., Fallick A. E., Sáez R., Almodóvar G. R. A new sulphur isotopic study of some Iberian Pyrite Belt deposits: evidence of a textural control on sulphur isotope composition, Mineralium Deposita, 1998, V. 34, pp. 4–18.
52. Wan B., Zhang L. C., Xiang P. The Ashele VMS-type Cu-Zn deposit in Xinjiang, NW China formed in a rifted arc setting, Resource Geology, 2010, V. 60, No. 2, pp. 150–164.
53. 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, V. 37, No. 2, pp. 114–126.
54. Wang D. H., Chen Y. C., Mao J. W. The Ashele deposit: a recently discovered volcanogenic massive sulfide Cu-Zn deposit in Xinjiang, China, Resource Geology, 1998, V. 48, No. 1, pp. 31–42.
55. Wang J. B., Qin K. Z., Wu Z. L., Hu J. H., Deng J. N. Volcanic-exhalative-sedimentary lead zinc deposit in the southern margin of the Altai, Xinjiang, Beijing, Geology Publishing House, 1998, pp. 1–210.
56. Wilhem C., Windley B. F., Stampfli G. M. The Altaids of Central Asia: a tectonic and evolutionary innovative review, Earth-Science Reviews, 2012, V. 113.
57. 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, V. 222.
58. Yang F., Li Q., Yang C. D., Zhang Z. A combined fluid inclusion and S-H-O-He-Ar isotope study of the Devonian Ashele VMS-type copper-zinc deposit in the Altay orogenic belt, northwest China, Journal of Asian Earth Sciences, 2018, V. 161, pp. 139–163.
59. 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, V. 144.
60. Yang Y., Zhang H., Yang X., Sun C., Ren G., Li Y., Chen B., Jin M., Zhao X., Zhou N. Evolution of the hydrothermal ore-forming system of Ashele VMS-type Cu-Zn deposit in Xinjiang, NW China: insights from mineralogy and geochemistry of sulfides, *Ore Geol. Rev.*, 2024, V. 167.
61. 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, V. 72, pp. 65–82.
62. Yuan L., Liu F. Sulfide Re-Os age and Rb-Sr age of Talate Pb-Zn-Fe polymetallic deposit in Southern Altay and their geological significance, *Mineral Deposit.*, 2017, V. 36, pp. 1333–1351.
63. Zhang W., Zhang X., Liu G., Guo X. Magmatic-seawater interaction in the Keyinbulake Zn-Cu deposit (NW China): insight from sulfide S isotope and trace elements, *Ore Geol. Rev.*, 2026, V. 188.

Статья поступила в редакцию 15.09.26; одобрена после рецензирования 24.09.26; принята к публикации 24.09.26.
The article was submitted 15.09.26; approved after reviewing 24.09.26; accepted for publication 24.09.26.

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

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