

ФАКТОРЫ КОНЦЕНТРИРОВАНИЯ ЭЛЕМЕНТОВ-ПРИМЕСЕЙ В РУДАХ КОЛЧЕДАННЫХ МЕСТОРОЖДЕНИЙ ЮГА СИБИРИ

И.В. Гаськов, Э.Г. Дистанов, К.Р. Ковалев

Институт геологии СО РАН, 630090, Новосибирск, просп. Коптюга, 3, Россия

Широко развитые на территории южной части Сибири (Рудный Алтай, Восточная Тува, Северное Прибайкалье и Западное Забайкалье) вулканогенные колчеданно-полиметаллические месторождения по механизму образования подразделяются на 2 группы — вулканогенные гидротермальные (VHMS-тип) (Кызыл-Таштыг в Туве, Корбалихинское, Золотушинское, Юбилейное и др. в Рудном Алтае) и вулканогенно-осадочные (SEDEX-тип) (Холоднинское в Северном Прибайкалье и Озерное в Западном Забайкалье).

Изучение в сравнительном плане поведения элементов-примесей в основных типах руд и главных рудных минералах при вулканогенно-осадочном и вулканогенном гидротермальном формировании колчеданно-полиметаллических месторождений показало их существенное различие по спектру элементов и их содержаниям.

Установлены более высокие концентрации элементов-примесей в рудах вулканогенных гидротермальных месторождений, которые связаны, прежде всего, со спецификой формирования этих руд в условиях резкого падения температуры (вскипание растворов, смешение с морской водой) вызывающего массовое выпадение рудного вещества и соосаждение сопутствующих элементов, включая сорбционный захват кристаллизующимися сульфидными минералами.

Ограниченный спектр и более низкие концентрации элементов-примесей в рудах вулканогенно-осадочных месторождениях, напротив, обязаны спокойному ритмичному формированию хемогенных рудных образований из гидротермальных рассолов морских впадин. Ограниченное количество эндогенной серы и в связи с этим процесс восстановления и постепенного вовлечения в сульфидообразование серы морской воды исключали быстрое по времени массовое осаждение сульфидов и соответственно соосаждение сопутствующих элементов.

Колчеданно-полиметаллические месторождения, элементы-примеси, руды, вулканогенное рудообразование.

FACTORS DETERMINING CONCENTRATION OF TRACE ELEMENTS IN ORES OF PYRITE-POLYMETALLIC DEPOSITS IN SOUTHERN SIBERIA

I.V. Gas'kov, E.G. Distanov, and K.R. Kovalev

Volcanogenic pyrite-polymetallic deposits widespread in southern Siberia (Rudny Altai, eastern Tuva, northern Baikal region, and western Transbaikalia) are divided into two groups according to their formation mechanism: volcanogenic hydrothermal (VHMS-type) (Kyzyl-Tashtyg deposit in Tuva; Korbalikhinskoe, Zolotushinskoe, Yubileinoe, and other deposits in Rudny Altai) and volcanosedimentary (SEDEX-type) (Kholodninskoe deposit in the northern Baikal region and Ozernoe deposit in western Transbaikalia). Comparison of major ores and ore minerals during the volcanosedimentary and volcanogenic hydrothermal formation of pyrite-polymetallic deposits showed their significant difference in the spectrum and contents of trace elements. Ores of the VHMS deposits have high concentrations of trace elements as they formed under drastic drop in temperature (as a result of boiling-up of solutions and their mixing with sea water), which caused mass deposition of ore matter and coprecipitation of accompanying elements, including their sorption by crystallizing sulfide minerals. The poorer spectrum and lower concentrations of trace elements in ores of the SEDEX deposits are, on the contrary, related to the rhythmic formation of chemogenic ores from sea-floor brine pools. The reduced amount of endogenic sulfur and gradual reduction of sea water sulfur and its involvement in sulfide formation prevented rapid mass deposition of sulfides and, accordingly, coprecipitation of accompanying elements.

Pyrite-polymetallic deposits, trace elements, ores, volcanogenic ore formation

ВВЕДЕНИЕ

Как известно, на территории южной части Сибири широко развиты колчеданно-полиметаллические месторождения, связанные с разновозрастным проявлением вулканизма. Они образуют ряд самостоятельных рудных районов в Рудном Алтае, Восточной Туве, Северном Прибайкалье и Западном Забайкалье. По механизму образования среди них выделяется группа вулканогенных гидротермальных, развитых в различных по составу толщах (VHMS-тип), и группа вулканогенно-осадочных (гидротермально-осадочных) месторождений (SHMS-тип или SEDEX-тип), приуроченных к терригенно-осадочным и вулканогенно-осадочным толщам. К первой группе относятся кембрийские месторождения в Восточной Туве (Кызыл-Таштыг, Дальнее) и месторождения девонского возраста в северо-западной части Рудного Алтая

(Корбалихинское, Золотушинское, Юбилейное, Захаровское, Рубцовское и др.). Вулканогенно-осадочные месторождения представлены уникальными по запасам руд и металлов Холоднинским месторождением в верхнепротерозойских толщах Северного Прибайкалья и Озерным месторождением в нижнекембрийских толщах Западного Забайкалья (рис. 1).

Геологическое строение, особенности состава оруденения и базовые геолого-генетические модели указанных выше месторождений детально описаны в монографиях, посвященных конкретным месторождениям [1—4]. В ряде публикаций последних лет в сравнительном плане рассмотрены вопросы изотопного состава сульфидной серы руд [5] и поведение золота и серебра в рудах этих двух групп месторождений [6, 7]. Отмечается определенная специфика как по изотопному составу серы руд, так и по содержанию и распределению золота и серебра в месторождениях вулканогенно-осадочного и вулканогенного гидротермального генезиса.

Целью настоящей статьи является изучение в сравнительном плане поведения малых элементов (элементов-примесей) в основных типах руд и главных рудных минералах при вулканогенно-осадочном и вулканогенном гидротермальном формировании колчеданно-полиметаллических месторождений и выявление возможных причин дифференцированного накопления элементов-примесей в разных типах руд и месторождений.

Для этой цели были рассмотрены содержания и характер распределения элементов-примесей в месторождениях вулканогенно-осадочного (Холоднинское, Озерное) и вулканогенного гидротермального генезиса (Кызыл-Таштыг и Рудно-Алтайские), отвечающие двум модельным типам — красноморскому и придонного рудообразования (sub-sea floor), описанных в работах [1—3, 8].

ОБЩАЯ ГЕОЛОГИЧЕСКАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАССМАТРИВАЕМЫХ МЕСТОРОЖДЕНИЙ

Северо-западная часть Рудного Алтая расположена на северо-западе протяженного Рудно-Алтайского полиметаллического пояса и территориально входит в состав Российской Федерации. В пределах этой территории выделяются три рудных района — Змеиногорский, Золотушинский и Рубцовский, включающие более двух десятков колчеданно-полиметаллических и полиметаллических месторождений. Оруденение генетически связано с многоактным вулканизмом контрастной базальт-риолитовой формации антидромной направленности и залегает на разных стратиграфических уровнях средневерхнедевонского разреза (эйфельский, живетский, франский ярусы) в породах, сформировавшихся в различных фациальных условиях — от существенно вулканогенных до осадочных. Нами изучены типичные представители колчеданно-полиметаллических месторождений разных рудных районов — Корбалихинское (Змеиногорский рудный район), Юбилейное (Золотушинский рудный район), Захаровское (Рубцовский рудный район). Руды этих месторождений слагают стратифицированные рудные залежи линзовидной, пластообразной, реже лентовидной морфологии (рис. 2). Со стороны лежачего бока они представлены преимущественно прожилково-вкрапленными разновидностями, а в центральных и верхних частях разреза развиты массивные и реже брекчиевидные текстурные типы. По минеральному составу среди руд преобладают колчеданно-полиметаллические разновидности, подчиненное развитие имеют колчеданные и полиметаллические минеральные типы и редко отмечаются медно-колчеданные и барит-полиметаллические разновидности. По своему генезису все изученные месторождения относятся к вулканогенному гидротермальному типу и сформировались по модели придонного рудоотложения в условиях небольших



Рис. 1. Схема размещения колчеданно-полиметаллических месторождений.

1 — Юбилейное, 2 — Корбалихинское, 3 — Захаровское, 4 — Кызыл-Таштыг, 5 — Холоднинское, 6 — Озерное.

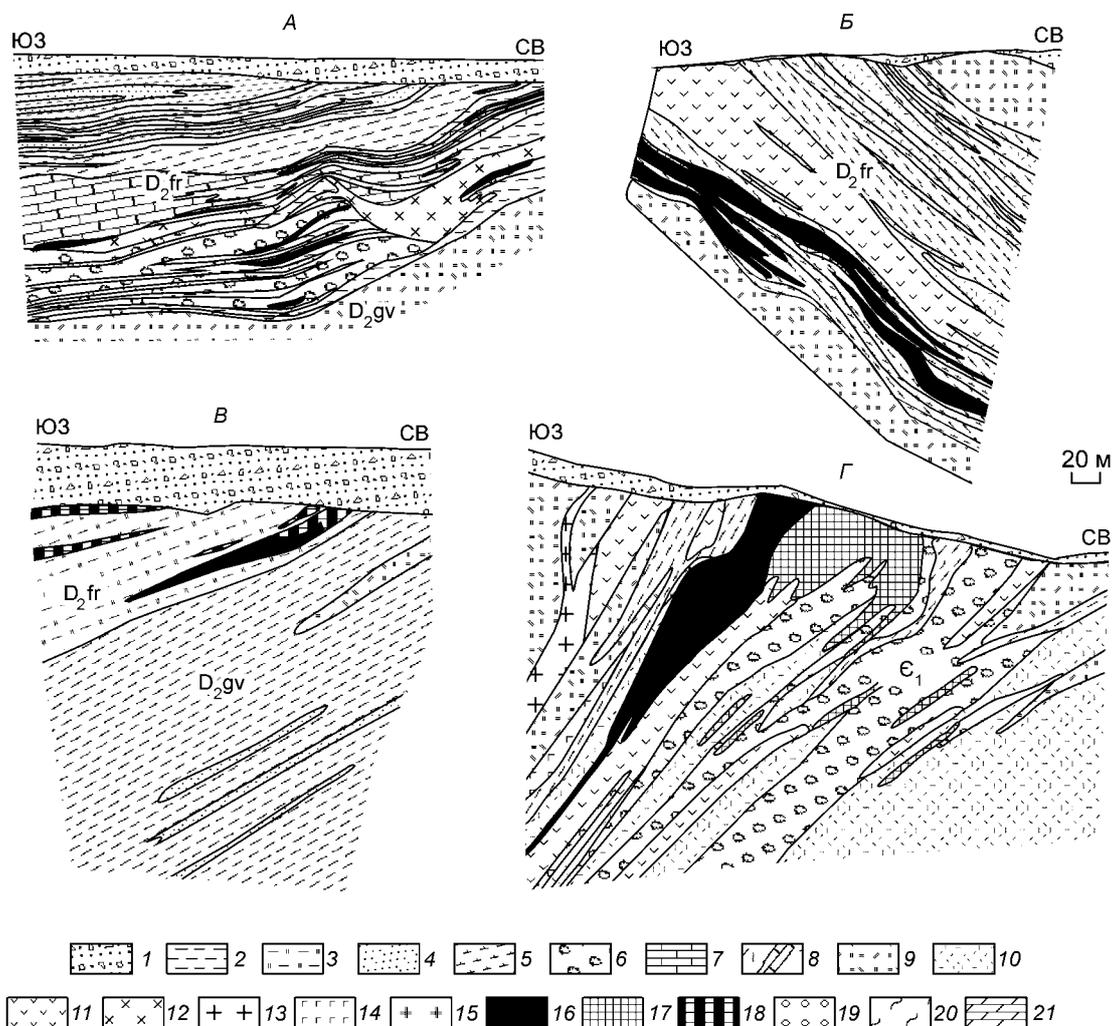


Рис. 2. Геологические разрезы колчеданно-полиметаллических месторождений вулканогенного гидротермального генезиса.

А — Юбилейное, *Б* — Корбалихинское, *В* — Захаровское (Рудный Алтай); *Г* — Кызыл-Таштыг (Тува).

1 — рыхлые четвертичные отложения; 2 — глинисто-кремнистые алевропелиты, кварц-серицитовые и слюдисто-кремнистые сланцы; 3 — известково-глинистые алевролиты и алевропелиты; 4 — полимиктовые алевропесчаники и песчаники; 5 — туфопесчаники и туфиты; 6 — брекчии смешанного состава; 7 — известняки и известковистые сланцы; 8 — известковистые брекчии; 9 — туфы и лавы риолитового и риолит-дацитового составов и их измененные аналоги (серицит-кварцевые ортосланцы); 10 — туфы и лавы дацит-андезитового и андезитового составов и их измененные аналоги (кварц-серицит-хлоритовые ортосланцы); 11 — туфы и лавы андезит-базальтового и базальтового составов и их измененные аналоги (хлоритовые и хлорит-карбонатные ортосланцы, ортоамфиболиты); 12 — субвулканические риолитовые и риолит-дацитовые порфиры; 13 — субвулканические дацитовые порфиры (альбитофиры); 14 — субвулканические диабазовые и габбро-диабазовые порфириты и измененные их аналоги (ортоамфиболиты); 15 — дайки сиенит-порфиров; 16 — колчеданно-полиметаллические руды; 17 — колчеданные руды; 18 — зоны окисления по колчеданным и колчеданно-полиметаллическим рудам; 19 — метаморфические порфиробластические породы гранат-биотит-кварцевого, биотит-кварцевого и кварц-плагноклаз-амфиболового составов; 20 — гидротермально-метасоматические породы альбит-калийшпатового состава; 21 — гидротермально-метасоматические сидериты.

глубин без выхода гидротермальных растворов в бассейн седиментации [2]. Температуры формирования основной массы руд, по данным гомогенизации газовой-жидких включений и изотопной термометрии, составляли 300—350 °C [9].

Восточная Тува. Месторождения Кызыл-Таштыг и Дальнее приурочены к нижнекембрийским существенно вулканогенным отложениям туматтайгинской свиты, сложной контрастной существенно натровой риолит-базальтовой формацией известково-щелочной серии. Они приурочены к Кызыл-Таштыгской вулканотектонической депрессии, образуя единое Кызыл-Таштыгское рудное поле в пределах Улогойской колчеданной зоны. Месторождение Кызыл-Таштыг представлено компактной линзовидной залежью, имеющей зональное строение, отражающее условия ее образования [4, 10—12] (см. рис. 2, *Г*).

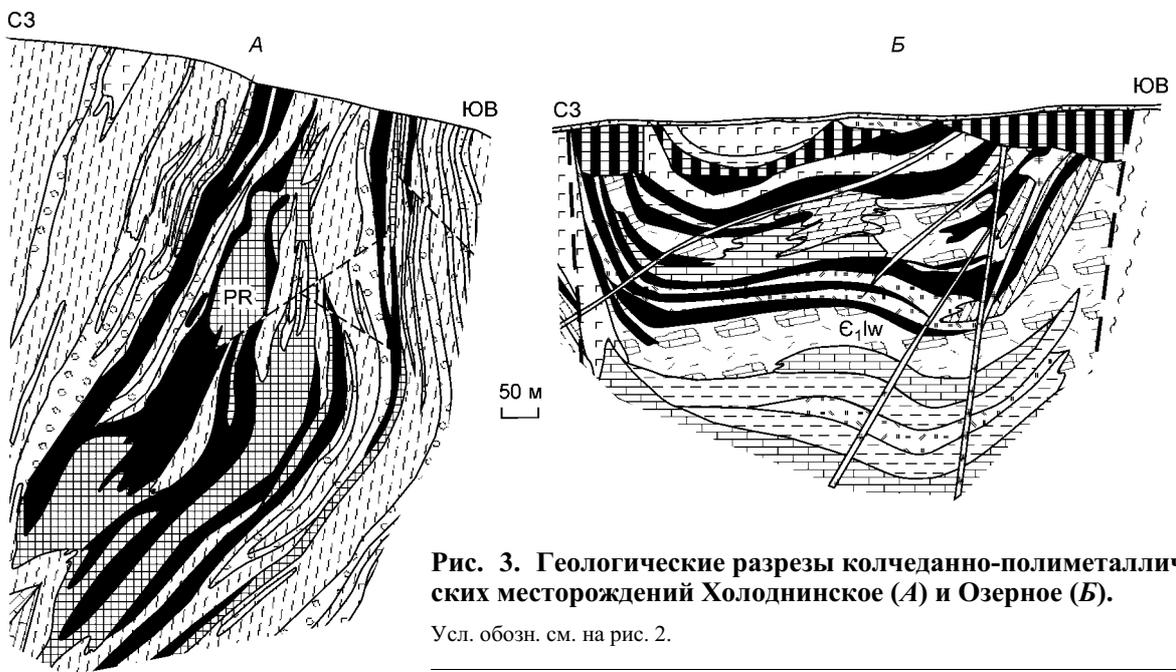


Рис. 3. Геологические разрезы колчеданно-полиметаллических месторождений Холоднинское (А) и Озерное (Б).

Усл. обозн. см. на рис. 2.

Нижние корневые зоны представлены гнездово-прожилковыми и прожилково-вкрапленными кварц-халькопирит-пиритовыми и пиритовыми рудами; центральная часть, являющаяся основной зоной разгрузки гидротермальных растворов, сложена в основном массивными и брекчиевидными халькопирит-сфалеритовыми и халькопирит-пиритовыми их разновидностями, верхние и фланговые части выполнены колчеданно-полиметаллическими и барит-полиметаллическими рудами завершающих стадий рудообразующего процесса. Температуры рудообразования на месторождении достигали 370 °С. Месторождение Дальнее характеризуется небольшими запасами и по своим геолого-генетическим признакам является близким аналогом месторождения Кызыл-Таштыг. Температуры образования здесь не превышали 350 °С.

Северное Прибайкалье. На этой территории в структурах байкалид, обрамляющих с юго-востока Сибирскую платформу, располагается крупнейшее в России Холоднинское месторождение [1, 13]. Оно локализуется в юго-восточном борту Олокитской троговой структуры и приурочено к толще углеродистых флишоидно-турбидитовых отложений рифейского возраста (рис. 3, А). Оруденение представлено пластовыми и линзовидными телами мощностью до 280 м и протяженностью до 7,5 км, имеющими большей частью четкое слоистое и ритмично-слоистое строение [5, 14]. В строении рудной зоны в целом отмечается однонаправленная зональность, представленная более широким развитием колчеданных и медно-колчеданных руд в лежачем ее боку и колчеданно-полиметаллических и полиметаллических руд — в центральной части и висячем боку рудной зоны. Формирование месторождения, по данным большинства исследователей, связано с проявлением базальтоидного магматизма в обстановке внутриконтинентального рифтогенеза и происходило на дне бассейна в локальных депрессионных структурах при относительно спокойном гидродинамическом режиме и резко восстановительной обстановке рудоотложения. Температуры рудоотложения, по данным исследования изотопного состава серы сосуществующих пар сульфидов, не превышали 150 °С [15].

Западное Забайкалье. На территории Западного Забайкалья в пределах фрагмента нижнекембрийской островной дуги среди вулканогенно-осадочных пород выявлено уникальное по запасам Озерное колчеданно-полиметаллическое месторождение [3, 16, 17]. Оруденение представлено линзовидными и пластообразными рудными телами слоистого и ритмично-слоистого строения (см. рис. 3, Б). Основная масса руд имеет тонко- и скрытокристаллическое строение. По минеральному составу преобладают руды галенит-сфалерит-пиритового и пирит-сидеритового составов. Отложение их происходило в мелководном бассейне параллельно с формированием карбонатных рифогенных построек при неустойчивом окислительно-восстановительном потенциале и рН среды. Руды отлагались гидротермально-осадочным путем по типу красноморской модели [18]. Температуры образования руд Озерного месторождения, судя по их скрыто- и тонкокристаллическому строению, мелководным условиям формирования, а также по аналогии с условиями современного отложения сульфидных осадков в Красноморских впадинах, были невысокими, не превышающими, вероятно, 100—150 °С.

МИНЕРАЛЬНЫЙ СОСТАВ РУД И ИХ ГЕОХИМИЧЕСКИЕ ЧЕРТЫ

Как известно, многие колчеданно-полиметаллические и полиметаллические месторождения относятся к комплексным месторождениям и являются поставщиками многих редких элементов. В рудах этих месторождений наряду с главными рудными компонентами (Fe, Zn, Pb, Cu, Ba) содержится широкий спектр элементов-примесей (Cd, Ge, In, Ga, As, Sb, Bi, Tl, Te, Se, Au, Ag). В то же время многими исследователями отмечаются различные уровни концентраций элементов-примесей в однотипных рудах разных месторождений. В связи с этим в данной работе на примере колчеданно-полиметаллических месторождений Сибири проведено изучение геохимических особенностей руд и рудных минералов вулканогенных гидротермальных и гидротермально-осадочных месторождений с целью установления влияния условий рудообразования на геохимическую специфику руд. Все рассматриваемые месторождения относятся к группе хорошо изученных объектов. На них проведены все виды поисково-разведочных работ с подсчетом запасов. Практически по всем месторождениям имеются данные химического анализа групповых проб и крупнообъемных технологических проб на широкий спектр элементов, а также проведен большой объем аналитических исследований руд и рудных минералов разными организациями и исполнителями. Нами изучение содержания элементов-примесей в рудах и рудных минералах колчеданно-полиметаллических месторождений проводилось с использованием результатов атомно-абсорбционного, спектрального, нейтронно-активационного и рентгеноспектрального (на микроанализаторах JXA-5 (Япония) и Camebax Micro (Франция)) анализов, выполненных в лабораториях Аналитического центра ОИГГМ СО РАН (г. Новосибирск), а также с привлечением данных опробования технологических и групповых проб, полученных на разных стадиях разведки месторождений. Сравнение геохимических характеристик различных месторождений проводилось в основном по колчеданно-полиметаллическому (галенит-сфалерит-пиритовому) минеральному типу руд, который характеризуется наибольшим развитием на рассматриваемых нами месторождениях и отличается широким спектром значимо определяемых элементов-примесей. По отдельным месторождениям, где более широко развиты колчеданные (пиритовые) руды, также проведены исследования по этому типу руд.

Геохимические особенности руд и рудных минералов в вулканогенных гидротермальных месторождениях. В этой группе мы рассмотрим месторождения северо-западной части Рудного Алтая (Юбилейное, Корбалихинское, Захаровское) и месторождение Кызыл-Таштыг (Восточная Тува).

Рудная зона Юбилейного месторождения представлена чередованием согласных и субсогласных линзовидных рудных тел и гидротермально-метасоматических пород (см. рис. 2, А). Рудные тела сложены в основном гнездово-прожилково-вкрапленными и меньше массивными и полосчатыми рудами. По минеральному составу здесь преобладают колчеданно-полиметаллические (галенит-сфалерит-пиритовые) руды. В меньшей мере развиты полиметаллические (галенит-сфалеритовые), колчеданные (пиритовые) и медно-колчеданные (халькопирит-пиритовые) разновидности. Главными рудными минералами являются пирит, сфалерит, галенит, халькопирит. В качестве второстепенных и редких установлены блеклая руда, магнетит, гематит, борнит, ковеллин, мельниковит и марказит. На верхних горизонтах руд существенную роль играет барит.

На Корбалихинском месторождении оруденение представлено серией кулисообразно расположенных линзовидных рудных тел, сложенных колчеданно-полиметаллическими и в меньшей мере колчеданными, медно-колчеданными и полиметаллическими минеральными типами (см. рис. 2, Б). Главными рудными минералами являются сфалерит, пирит, галенит, халькопирит, из второстепенных и редких минералов установлены блеклая руда, марказит, магнетит, кубанит, борнит. Редко отмечается барит.

На Захаровском месторождении оруденение также образует стратифицированный рудный горизонт, включающий серию сменяющих друг друга по простиранию линзовидных и пластообразных рудных тел, и мелкие рудные линзы, развитые в их висячих и лежащих боках (см. рис. 2, В). Сложены рудные тела преимущественно гнездово-прожилково-вкрапленными и реже массивными рудами. По минеральному составу на месторождении преобладают колчеданно-полиметаллические (галенит-пирит-сфалеритовые) руды и в меньшей мере развиты полиметаллические (галенит-сфалеритовые) и колчеданные (пиритовые) разновидности. Главными минералами руд являются сфалерит, пирит, галенит и халькопирит. Из второстепенных установлены блеклая руда, марказит, ковеллин. Барит встречается крайне редко.

Изучение геохимических особенностей руд Рудно-Алтайских месторождений проводилось многими исследователями [19—23]. Установлено, что колчеданно-полиметаллические руды характеризуются широким спектром элементов-примесей (табл. 1). Помимо основных рудных компонентов — Cu, Pb, Zn, Ba, а также Au и Ag, распределение которых рассмотрены нами ранее [6, 7], в рудах этих месторождений установлен спектр элементов, практически полностью соответствующий ряду, выделенному А.Е. Ферсманом для сульфидных месторождений. Большинство их относится к халькофильным элементам — As, Sb, Bi, Cd, Ga, In, Ge, Se, Te и часть к сидерофильным — Co, Ni и Mo. Наибольшие коэффициенты концентрирования (в 1000 раз и более) по сравнению с кларками в кислых и основных породах имеют мышьяк, сурьма, висмут и кадмий. Галлий, индий и германий имеют концентрации, близкие к кларкам

Таблица 1. Содержание главных рудных компонентов и элементов-примесей в рудах месторождений Сибири

Месторождение	Тип руды, число проб	Zn	Pb	Cu	Va	As	Sb	Bi	Cd	Ga	In	Ge	Se	Te	Co	Ni	Mo
		г/т															
		%															
Корбалихинское	КП, 27	9,81	2,01	1,46	0,3	$\frac{300-4700}{2100}$	$\frac{100-1400}{500}$	$\frac{Н.о.-200}{90}$	$\frac{190-1200}{810}$	$\frac{Н.о.-16}{7}$	$\frac{Н.о.-5}{1}$	$\frac{Н.о.-10}{5}$	$\frac{Н.о.-70}{58}$	$\frac{Н.о.-10}{2}$	$\frac{4-50}{26}$	$\frac{Н.о.-30}{8}$	$\frac{Н.о.-50}{5}$
		8,08	2,15	1,46	5,02	$\frac{200-9300}{7800}$	$\frac{100-5900}{3300}$	$\frac{30-90}{52}$	$\frac{10-880}{520}$	$\frac{1-50}{20}$	$\frac{Н.о.-6}{1}$	Н.о.	$\frac{Н.о.-50}{27}$	Н.о.	$\frac{Н.о.-20}{7}$	$\frac{Н.о.-30}{10}$	$\frac{Н.о.-100}{20}$
Захаровское	КП, 33	10,6	5,96	2,03	0,3	$\frac{200-1200}{4400}$	$\frac{200-3300}{1500}$	$\frac{20-380}{180}$	$\frac{290-1500}{890}$	$\frac{10-220}{110}$	Н.о.	$\frac{Н.о.-6}{1}$	$\frac{10-300}{130}$	$\frac{5-30}{20}$	$\frac{Н.о.-19}{9}$	$\frac{10-30}{15}$	$\frac{Н.о.-30}{5}$
		1,87	0,11	0,36	1,7	$\frac{30-700}{240}$	$\frac{10-150}{26}$	$\frac{Н.о.-20}{9}$	$\frac{19-200}{80}$	$\frac{Н.о.-15}{2}$	$\frac{Н.о.-15}{4}$	$\frac{Н.о.-10}{3}$	$\frac{Н.о.-400}{160}$	$\frac{Н.о.-100}{24}$	$\frac{40-500}{160}$	$\frac{Н.о.-90}{15}$	$\frac{Н.о.-30}{5}$
Холоднинское	К, 22	1,28	0,19	0,28	<0,01	$\frac{150-1300}{500}$	$\frac{10-500}{79}$	$\frac{Н.о.-10}{3}$	$\frac{1-50}{23}$	Н.о.	$\frac{Н.о.-5}{1}$	Н.о.	$\frac{Н.о.-10}{1}$	$\frac{Н.о.-50}{15}$	$\frac{Н.о.-130}{40}$	$\frac{Н.о.-100}{30}$	Н.о.
		5,2	0,79	0,04	<0,01	$\frac{100-1500}{500}$	$\frac{50-500}{83}$	Н.о.	$\frac{10-2000}{140}$	Н.о.	Н.о.	»	$\frac{Н.о.-10}{3}$	$\frac{Н.о.-100}{20}$	$\frac{Н.о.-8}{1}$	$\frac{Н.о.-5}{1}$	»
Озерное	К, 33	1,08	0,1	0,35	0,06	$\frac{Н.о.-200}{9}$	$\frac{Н.о.-100}{3}$	Н.о.	$\frac{Н.о.-15}{1}$	$\frac{Н.о.-15}{5}$	»	»	Н.о.	Не опр.	$\frac{Н.о.-18}{4}$	Н.о.	»
		6,2	1,2	0,01	0,12	$\frac{100-6000}{700}$	$\frac{Н.о.-200}{40}$	Н.о.	$\frac{30-2000}{150}$	$\frac{Н.о.-70}{9}$	»	»	»	Н.о.	$\frac{Н.о.-30}{3}$	»	»

Примечание. Анализы выполнены спектральным и атомно-абсорбционным методами в Аналитическом центре ОИГТМ СО РАН. Н.о. — не обнаружено. Над чертой — вариации, под чертой — средние содержания элементов-примесей в колчеданных (К) и колчеданно-полиметаллических (КП) рудах месторождений Сибири.

Таблица 2.

Содержания элементов-примесей в сфалерите руд колчеданно-полиметаллических месторождений Сибири

Месторождение	Кол-во проб	Fe	Mn	Cd	Ag	Hg	Ge	In	Tl
Корбалихинское	25	$\frac{0,21 - 3,26}{1,75}$	$\frac{10 - 1500}{500}$	$\frac{1200 - 3200}{2100}$	$\frac{1 - 200}{50}$	$\frac{1 - 500}{150}$	Н.о.	Н.о.	Н.о.
Юбилейное	16	$\frac{0,1 - 3,62}{0,42}$	$\frac{10 - 600}{300}$	$\frac{2500 - 6500}{3200}$	$\frac{0,5 - 200}{20}$	$\frac{1 - 500}{120}$	Н.о.	$\frac{Н.о. - 3}{1}$	»
Захаровское	8	$\frac{0,1 - 3,47}{1,19}$	$\frac{10 - 1300}{500}$	$\frac{1600 - 5700}{2800}$	$\frac{5 - 100}{40}$	Не опр.	Н.о.	$\frac{Н.о. - 3}{1}$	»
Кызыл-Таштыг	12	$\frac{0,21 - 2,13}{0,59}$	$\frac{10 - 1200}{200}$	$\frac{1600 - 2900}{2400}$	$\frac{5 - 200}{30}$	$\frac{1 - 100}{30}$	$\frac{1 - 50}{10}$	$\frac{Н.о. - 10}{3}$	»
Холоднинское	10	$\frac{3,71 - 6,60}{6,36}$	$\frac{1000 - 4000}{1600}$	$\frac{500 - 2000}{1200}$	$\frac{3 - 30}{10}$	Н.о.	Н.о.	Н.о.	$\frac{1 - 200}{40}$
Озерное	15	$\frac{1,50 - 3,85}{2,83}$	$\frac{1500 - 8800}{3500}$	$\frac{800 - 2000}{1600}$	$\frac{3 - 10}{5}$	»	»	»	$\frac{1 - 30}{4}$

П р и м е ч а н и е. Содержания железа представлены в мас.%, все остальные элементы в г/т. В табл. 2—6 анализы выполнены рентгеноспектральным методом на микроанализаторах JXA-5 (Япония) и Camebax-Micro (Франция) и атомно-абсорбционным методом на спектрометре Perkin-Elmer (Германия) в Аналитическом центре ОИГГМ СО РАН. Для табл. 2—5, 7: над чертой — вариации, под чертой — среднее содержание элементов-примесей.

метапелитов, а никель и кобальт характеризуются величинами, близкими к кларкам кислых пород. Подавляющее большинство выявленных в рудах элементов-примесей концентрируются в основных рудных минералах — сфалерите, галените, пирите, халькопирите, блеклых рудах и редко образуют самостоятельные минеральные фазы.

Сфалерит в качестве главных элементов-примесей включает Fe, Mn и Cd (табл. 2, рис. 4). Содержание этих элементов неравномерное и изменяется в широких пределах. Наибольшие колебания установлены по железу — 0,1—3,62 % (среднее 1,2 %). Содержания же марганца и кадмия в целом невысокие и не превышают десятых долей процента. В меньших количествах и с крайне неравномерным распределением фиксируются в сфалерите Ag, Hg и некоторые другие элементы (см. табл. 2). Галенит на уровне первых сотен граммов на тонну содержит Cd, As, Sb, еще в меньших количествах — Ag, Tl и Mn (табл. 3). Пирит же имеет ограниченный набор элементов-примесей. Концентрации на уровне первых сотен граммов на тонну в нем установлены лишь по Co и Hg. Содержания других элементов-примесей не превышают граммы и первые десятки граммов на тонну (табл. 4). Халькопирит характеризуется более широким спектром элементов-примесей, однако уровни их концентраций не превышают первые сотни граммов на тонну (табл. 5). Блеклая руда отличается переменным составом (табл. 6). В качестве главных катионов выделяются Cu, Zn, Fe, Ag и в меньшей мере Hg. Содержания As и Sb изменяются в широких пределах, но в целом для колчеданно-полиметаллических месторождений характерно преобладание мышьяко-вистых разновидностей. В блеклых рудах этих месторождений отмечается также повышенная примесь Se и Te ($n \cdot 10$ г/т).

Таблица 3.

Содержания элементов-примесей в галените руд колчеданно-полиметаллических месторождений Сибири (г/т)

Месторождение	Кол-во проб	Ag	Cd	As	Sb	Bi	Mn	Ti
Корбалихинское	3	$\frac{30 - 100}{80}$	$\frac{100 - 1000}{200}$	$\frac{200 - 1000}{300}$	$\frac{100 - 1000}{500}$	Н.о.	$\frac{1 - 10}{7}$	$\frac{10 - 30}{10}$
Юбилейное	4	$\frac{30 - 100}{70}$	$\frac{100 - 3000}{800}$	$\frac{100 - 3000}{1000}$	Н.о.	$\frac{10 - 1000}{300}$	Н.о.	$\frac{10 - 30}{10}$
Захаровское	11	$\frac{10 - 100}{60}$	$\frac{100 - 3000}{700}$	$\frac{100 - 1000}{300}$	$\frac{100 - 1000}{200}$	$\frac{10 - 3000}{600}$	»	$\frac{10 - 100}{30}$
Кызыл-Таштыг	3	$\frac{200 - 300}{230}$	$\frac{10 - 500}{80}$	$\frac{100 - 2000}{900}$	$\frac{300 - 2000}{1100}$	$\frac{8 - 200}{120}$	$\frac{30 - 60}{50}$	$\frac{10 - 250}{50}$
Холоднинское	8	$\frac{100 - 1000}{650}$	Н.о.	$\frac{100 - 1500}{900}$	$\frac{100 - 3500}{1000}$	$\frac{10 - 700}{100}$	$\frac{10 - 500}{40}$	$\frac{100 - 1000}{400}$

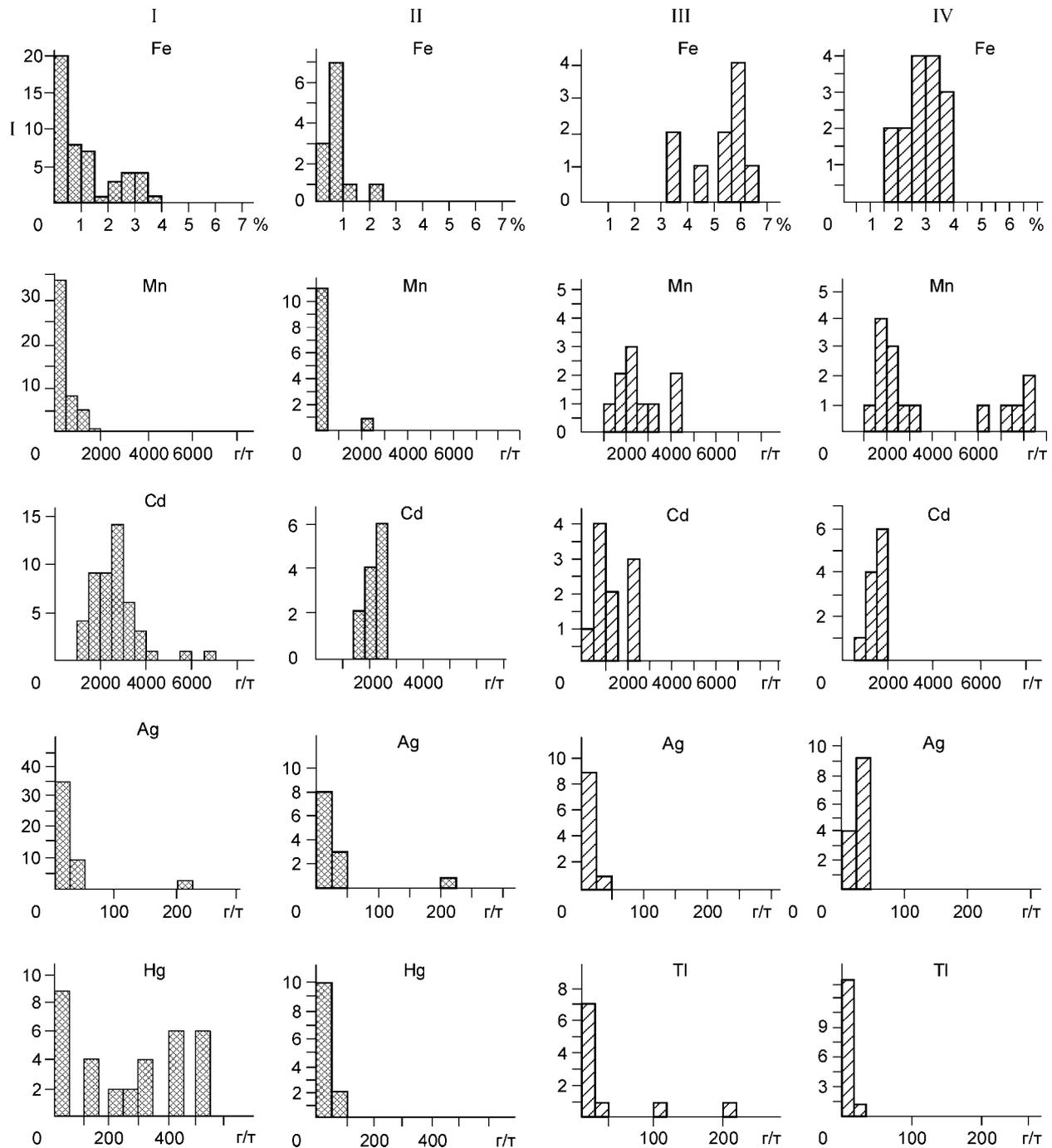


Рис. 4. Гистограммы распределения элементов-примесей в сфалеритах колчеданно-полиметаллических месторождений.

I — северо-западной части Рудного Алтая; II — Кызыл-Таштыга; III — Холоднинского и IV — Озерного месторождений. По горизонтальной оси — содержание элементов, по вертикальной — число проб.

На Кызыл-Таштыгском месторождении минеральный состав руд в целом представлен довольно ограниченным набором рудных минералов: главными здесь являются сфалерит, халькопирит, пирит и галенит, из второстепенных — наибольшее распространение имеют блеклые руды, магнетит и гематит. В единичных зернах установлены пирротин, борнит, арсенопирит, аргентит и самородное золото. В верхних горизонтах рудных тел в составе руд существенную роль играет барит.

Спектр элементов-примесей в рудах этого месторождения близок месторождениям Рудного Алтая (см. табл. 1). Однако в рудах разного минерального состава отмечается некоторое различие по содер-

Таблица 4. **Содержания элементов-примесей в пирите руд колчеданно-полиметаллических месторождений Сибири (г/т)**

Месторождение	Кол-во проб	Co	Ni	As	Sb	Hg	Ag
Корбалихинское	6	$\frac{10 - 300}{100}$	$\frac{\text{Н.о.} - 10}{10}$	Н.о.	Н.о.	$\frac{1 - 100}{10}$	$\frac{1 - 30}{10}$
Юбилейное	9	$\frac{3 - 300}{40}$	$\frac{1 - 20}{6}$	»	»	$\frac{1 - 100}{70}$	$\frac{1 - 100}{20}$
Захаровское	8	$\frac{1 - 300}{100}$	$\frac{1 - 30}{10}$	»	»	$\frac{1 - 100}{90}$	$\frac{1 - 30}{15}$
Кызыл-Таштыг	3	$\frac{50 - 200}{100}$	$\frac{1 - 10}{5}$	$\frac{10 - 200}{70}$	»	Н.о.	$\frac{1 - 10}{7}$
Холоднинское	29	$\frac{10 - 100}{20}$	$\frac{1 - 20}{6}$	$\frac{100 - 1500}{280}$	$\frac{1 - 150}{28}$	»	$\frac{1 - 50}{9}$
Озерное	20	$\frac{3 - 30}{10}$	$\frac{1 - 10}{6}$	$\frac{300 - 1000}{250}$	$\frac{1 - 300}{70}$	»	$\frac{30 - 100}{50}$

жанию этих элементов. Так, существенно колчеданные руды, сложенные преимущественно пиритом с резко подчиненным количеством сфалерита, галенита и халькопирита, характеризуются повышенным содержанием Co, Ni и Se, а в полиметаллических и колчеданно-полиметаллических рудах, состав которых представлен в основном сфалеритом, галенитом и пиритом (халькопирит в виде примеси), существенно преобладают концентрации Cd, As и Sb.

Как видно из приведенного выше минерального состава руд, большая часть выявленных элементов-примесей не образуют самостоятельных минеральных фаз, а рассеяны в главных рудных минералах. Анализ этих минералов показывает следующее распределение в них элементов-примесей.

В сфалерите постоянно присутствует Fe, содержание которого изменяется от десятых долей процента до 2,13 %. Повышенные концентрации с широкими вариациями имеет в нем Cd. В меньших количествах выявлены Mn, Ag, Hg, Ge и в единичных образцах In (см. табл. 2). В халькопирите на уровне первых сотен граммов на тонну фиксируются концентрации Mn, Ag и Cd, а в пирите на таком же уровне отмечается примесь Co. Галенит обогащен As, Sb, Ag и Bi.

Геохимические особенности руд и рудных минералов в вулканогенно-осадочных месторождениях. Эта группа месторождений рассмотрена на примере Холоднинского и Озерного месторождений.

Зона оруденения Холоднинского месторождения представлена согласными рудными залежами, сложенными ритмичным чередованием руд и безрудных прослоев (см. рис. 2,А). В строении рудной зоны в целом и отдельных рудных тел отмечается зональное распределение различных минеральных типов руд. В нижней ее части и на северо-западе главной (первой) рудной зоны развиты преимущественно колчеданные и меньше медно-колчеданные руды, а в центральной и юго-западной частях преобладают колчеданно-полиметаллические. Главными минералами руд являются сфалерит, пирит, галенит и меньше халькопирит. Из второстепенных и редких минералов установлены блеклые руды, пирротин, арсенопирит, сульфосоли, магнетит и гудмундит (FeSbS).

Таблица 5. **Содержания элементов-примесей в халькопирите руд колчеданно-полиметаллических месторождений Сибири (г/т)**

Месторождение	Кол-во проб	Mn	As	Sb	Bi	Ag	Cd	Co	Ni
Корбалихинское	7	$\frac{10 - 30}{20}$	$\frac{1 - 1000}{100}$	Н.о.	$\frac{1 - 30}{10}$	$\frac{1 - 100}{30}$	$\frac{1 - 1000}{200}$	$\frac{1 - 300}{50}$	$\frac{1 - 30}{5}$
Юбилейное	6	$\frac{1 - 20}{10}$	$\frac{100 - 3000}{600}$	$\frac{1 - 1000}{100}$	$\frac{1 - 30}{10}$	$\frac{10 - 30}{20}$	$\frac{1 - 3000}{1000}$	$\frac{1 - 100}{20}$	$\frac{1 - 20}{6}$
Захаровское	6	$\frac{1 - 30}{15}$	$\frac{100 - 2000}{500}$	$\frac{1 - 1000}{100}$	$\frac{1 - 50}{20}$	$\frac{10 - 50}{30}$	$\frac{1 - 2000}{500}$	$\frac{1 - 300}{30}$	$\frac{1 - 30}{5}$
Кызыл-Таштыг	5	$\frac{50 - 600}{300}$	$\frac{1 - 100}{40}$	$\frac{1 - 30}{6}$	$\frac{1 - 10}{5}$	$\frac{5 - 300}{140}$	$\frac{1 - 1000}{300}$	$\frac{0,1 - 5}{1}$	Н.о.
Холоднинское	19	$\frac{100 - 1000}{300}$	$\frac{1 - 100}{10}$	Н.о.	Н.о.	$\frac{10 - 100}{60}$	$\frac{1 - 100}{20}$	Н.о.	Н.о.

Таблица 6. Состав блеклых руд из разных колчеданно-полиметаллических месторождений (мас.%)

Месторождение	№ пробы	Fe	Zn	Cu	Ag	As	Sb	Bi	Hg	S
Корбалихинское	422-771	1,88	5,78	35,86	2,52	1,48	27,10	0,08	0,02	24,97
	406-527	2,59	5,52	37,86	1,35	7,44	19,07	0,1	0,06	26,30
	550-289	1,03	7,93	39,80	0,17	19,75	2,53	0,08	0,04	28,26
Юбилейное	Ю-4	0,93	8,49	39,10	0,90	17,53	6,55	0,03	0,06	27,87
	Ю-13	0,72	7,51	36,23	3,42	9,62	16,25	0,05	0,05	26,21
	1150-567	0,54	9,25	40,15	0,10	19,50	3,73	0,26	0,04	28,12
Захаровское	382-159	2,20	7,16	39,75	0,02	19,66	2,49	0,07	He опр.	28,55
	542-158	1,29	7,48	41,11	0,02	21,43	0,65	0,06	»	28,30
	518-183	1,39	6,85	36,40	0,19	5,93	19,51	0,09	»	26,09
Холоднинское	192-147	5,0	1,7	30,6	11,1	0,6	26,0	Н.о.	Н.о.	23,8
	89-114	5,2	1,2	26,8	16,1	0,4	26,2	»	»	23,1
Озерное	0-1	5,0	4,4	40,3	1,0	16,0	5,4	»	»	28,1
	0-2	2,1	5,4	38,1	3,1	7,6	19,1	»	»	26,0

В целом руды Холоднинского месторождения характеризуются достаточно ограниченным спектром и невысокими концентрациями элементов-примесей (см. табл. 1). Из всего рассматриваемого спектра элементов в колчеданно-полиметаллических рудах значения на уровне сотен граммов на тонну имеют лишь As и Cd, в меньших количествах постоянно отмечается Sb, и лишь в отдельных пробах фиксируются Se, Te, Co, Ni. В колчеданных рудах эти особенности в целом сохраняются, отмечается даже некоторое увеличение содержаний Co и Ni. Общий минеральный состав руд, включая редкие минералы, показывает, что большая часть выявленных элементов-примесей не образуют самостоятельных минеральных фаз, а концентрируются в главных рудных минералах.

В сфалерите в качестве главной примеси установлено Fe (среднее — 6,36 %), также достаточно высокие значения (более 1 тыс. г/т) имеют Mn, Cd и на уровне десятков граммов на тонну зафиксированы Ag и Tl (см. табл. 2, рис. 4). Повышенные содержания элементов-примесей выявлены в галените. Концентрации на уровне сотен граммов на тонну здесь имеют Ag, As, Sb, Ta и Bi (см. табл. 3). Пирит и халькопирит напротив характеризуются ограниченным набором элементов-примесей (см. табл. 4, 5). Содержания на уровне сотен граммов на тонну в пирите имеет лишь As, а в халькопирите — Mn. В меньших количествах в первом установлены Co, Ni, Sb и Ag, а во втором — As, Ag и Cd. Анализ двух образцов блеклой руды показывает существенно сурьмяный ее состав. Главными катионами в них являются Cu и Ag, а Fe и Zn имеют подчиненное значение (см. табл. 6).

Оруденение Озерного колчеданно-полиметаллического месторождения представлено пластообразными рудными телами ритмично-слоистого и градационно-слоистого строения, залегающими среди терригенно-вулканогенно-осадочных отложений. Основная масса руд сложена тонко- и скрытокристаллическими разновидностями колчеданно-полиметаллического (галенит-сфалерит-пиритового) и колчеданного (сидерит-пиритового и пиритового) составов. Главными минералами руд являются пирит, сфалерит, галенит и халькопирит. Из второстепенных и редких установлены блеклые руды, магнетит, арсенопирит, пирротин. В верхних частях рудных ритмов постоянно отмечается барит.

По геохимическим признакам руды Озерного месторождения, так же как и Холоднинского, характеризуются ограниченным набором и низкими концентрациями элементов-примесей (см. табл. 1). В колчеданно-полиметаллических рудах на уровне сотен и десятков граммов на тонну установлены лишь содержания As, Cd и Sb. На грани чувствительности анализов находятся Ga и Co, а все остальные — за пределами чувствительности. В пиритовых и сидерит-пиритовых рудах величины элементов-примесей характеризуются еще более низкими значениями.

Изучение геохимии главных рудных минералов показало, что для сфалеритов Озерного месторождения наряду с повышенными содержаниями Fe (среднее 2,83 %) и Cd (1600 г/т), присущими сфалеритам других месторождений, отмечаются достаточно высокие содержания Mn (3500 г/т) (см. табл. 2). В незначительных количествах в нем также установлены примеси Ag и Tl. В пирите на уровне десятых долей процента установлены содержания мышьяка и на уровне десятков граммов на тонну Sb, Ag, Co и Ni (см. табл. 4). Блеклые руды имеют смешанный мышьяково-сурьмяный состав. В качестве катионов в них преобладают Cu и в подчиненных количествах развита Zn, Fe и Ag (см. табл. 6).

ОБСУЖДЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ

Приведенные данные по содержанию элементов-примесей в различных минеральных и генетических типах руд, а также в основных рудных минералах вулканогенных колчеданно-полиметаллических месторождений Сибири показывают дифференцированное накопление малых элементов как в разных минералах, минеральных разновидностях руд, так и в различных геолого-генетических типах месторождений. Отчетливо видно, что руды и минералы месторождений, относимых по условиям формирования к вулканогенному гидротермальному типу (Рудно-Алтайские месторождения, Кызыл-Таштыг), характеризуются более широким спектром и более высокими концентрациями элементов-примесей по сравнению с гидротермально-осадочными рудами, сформировавшимися в депрессионных структурах морского дна (Холоднинское и Озерное месторождения). Эти группы месторождений также достаточно отчетливо различаются по изотопному составу сульфидной серы руд [5, 9, 24] и по содержаниям золота и серебра [6].

Как известно, определенное влияние на состав руд колчеданных месторождений оказывает характер развития рудно-магматических систем, формирующих эти месторождения. Это прежде всего их источники (мантийные или коровые) и геодинамические обстановки проявления. Так, вулканогенные рудообразующие системы рудно-алтайского типа связаны с проявлениями контрастного базальт-риолитового вулканизма в обстановках девонских островных дуг [25], а Улогойской колчеданной зоны Тувы — с риолит-базальтовой формацией рифтогенных структур венд-кембрийского окраинного моря [8]. В целом для этих систем в составе рудоносного магматизма наряду с наличием глубинных базальт-андезитовых пород существенную роль (особенно для Рудного Алтая) играют кислые риолитовые и риолит-дацитовые образования, что свидетельствует о сложной мантийно-коровой природе рудно-магматических систем и связанных с ними рудных компонентов. Гидротермально-осадочные руды Холоднинского месторождения образовались в связи с базальтоидным вулканизмом в окраинно-континентальных рифтогенных трогах, а подобного типа руды Озерного месторождения связаны с последовательно дифференцированной базальт-андезит-дацитовой формацией нижекембрийской островной дуги [26]. В целом для этих месторождений в составе рудоносного магматизма преобладают андезит-базальтовые образования, что указывает на существенно глубинный мантийный источник рудномагматических систем. Поэтому в отличие от этого типа месторождений в составе руд вулканогенных гидротермальных месторождений отчетливо фиксируется влияние коровой составляющей в виде повышенных содержаний свинца и бария (см. табл. 1).

Основная же часть элементов-примесей изученных месторождений имеет глубинный источник, а разные величины их в рудах разных групп месторождений, на наш взгляд, связаны с различными условиями и механизмами образования этих месторождений.

Формирование вулканогенных гидротермальных месторождений в целом имеет близкие параметры и описывается двумя моделями. Образование месторождений северо-западной части Рудного Алтая (Корбалихинское, Юбилейное, Захаровское) происходило в субмаринной обстановке в условиях небольших глубин и слабо литифицированных осадков, без выхода гидротермальных растворов в бассейн седиментации. Температуры рудообразования составляли 250—350 °С. Главными факторами рудоотложения были вскипание высокотемпературных растворов в близповерхностных условиях и резкое снижение температуры и кислотности растворов [2]. Месторождение Кызыл-Таштыг формировалось по типу рудных холмов Восточно-Тихоокеанского поднятия [8]. Температуры образования руд этой группы месторождений в основном колеблются в пределах 250—350 °С. Причиной выпадения рудного вещества было резкое снижение температуры при смешении гидротермальных растворов с морской водой. Отложение этого типа руд происходило либо вблизи источника рудного вещества (рудные холмы на Кызыл-Таштыге), либо под покрывкой пород (Рудно-Алтайские месторождения), о чем свидетельствуют стабильные, близкие к метеоритному стандарту величины изотопного состава сульфидной серы руд [5]. Изотопные данные также указывают на основную роль в процессе рудообразования эндогенной серы. Эта сера, по-видимому, являлась составляющей сульфидных комплексов, участвовавших в транспортировке рудных элементов, а затем при их распаде участвовала в образовании сульфидных руд. Как отмечалось выше, главной причиной отложения сульфидных руд являлось резкое падение температуры, сопровождавшееся изменением кислотности—щелочности растворов, что приводило к нарушению устойчивости растворимых форм металлов (сульфидных и хлоридных комплексов) и массовому их выпадению в виде сульфидов. Массовое образование сульфидных минералов, а также кремнисто-железистых гидроокислов (гелей), описываемых в современных рудообразующих системах как „черные и белые курильщики“ [27, 28], вероятно, вызывало и соосаждение малых элементов. Механизм такого соосаждения мог иметь разную природу, включая сорбцию. По экспериментальным данным В.Л. Таусона с соавторами [29], сорбция может играть ключевую роль в поглощении несовместимых элементов растущими кристаллами при эндогенном минералообразовании. Существует механизм поглощения примеси, связанный с активной ролью поверхности кристалла и поверхностных дефектов, что способствует увеличению содержания элементов-примесей в рудных минералах [30].

Таблица 7. Пределы вариаций и средние содержания элементов-примесей в современных сульфидных образованиях и древних колчеданно-полиметаллических месторождениях

Месторождение	Zn	Pb	Cu	As	Sb	Bi	Cd	Ga	In	Ge	Co	Ni	Mo	Ag	Tl
Сульфидная залежь дол. Мидл-Вэлли	1,33	0,005	0,57	<1,0 - 60 15,7	0,1 - 3,9 1	0,5 - 5,5 2	10 - 129 38	H.o.	H.o.	<1,0 - 12 4	3,7 - 84 39	10 - 81 32	6,8 - 46 17,6	<1 - 5,5 3	<1,0 - 7,4 2,6
Сульфидные руды хр. Хуан-де-Фука	0,77 - 29,8 9,1	0,02 - 0,21 0,08	0,1 - 4,8 1,9	68 - 4436 1001	7 - 267 94,5	H.o. - 33 5	34 - 549 179	»	»	H.o. - 120 24	H.o. - 94 23	H.o. - 26 10	H.o. - 119 47	17 - 165 62	H.o. - 20 3
Сульфидные руды ВТП	1,89 - 8,73 4,6	0,015 - 0,03 0,024	1,3 - 3,1 2,1	47 - 431 177	2 - 31 12	H.o. - 0,27 0,07	52 - 192 97	»	»	H.o. - 37 14	66 - 244 194	4 - 50 26	25 - 115 71	12 - 42 28	H.o. - 7,4 2
Сульфидные руды САХ	1,39 - 1,65 1,52	0,013 - 0,02 0,018	1,8 - 6,3 4,1	73 - 133 103	8 - 39 24	H.o. - 0,77 0,4	62 - 113 88	»	»	H.o. - 26 13	11 - 54 33	6 - 23 15	59 - 67 63	19 - 52 36	H.o. - 6,0 3
Месторождения Урала (32 месторожд.)	10,6	0,26	2,03	До 9700 1440	До 670 76	До 300 74	До 900 146	До 57 12,5	До 22 3,8	До 37 5,6	До 1100 49	До 300 19	До 400 45	До 200 28	До 120 8
Раммельсберг	13,5	5,6	1,0	500	800	70	500	H.o.	20	3	150	20	H.o.	100	10
Меттен	8,46	1,15	0,006	690	420	H.o.	94	»	H.o.	He опр.	200	380	»	He опр.	240
Атлантис II	5,07	0,08	0,84	410	223	»	144	»	»	7,5	113	49	270	80	17

Примечание. Результаты анализов заимствованы из работ по уральским месторождениям [44]; по современным сульфидным образованиям дол. Мидл-Вэлли, хр. Хуан-де-Фука, ВТП САХ [34]; по месторождениям Меттен и Раммельсберг [45, 46]; по Атлантис II [31]. Содержания Zn, Pb, Cu даны в мас. %, остальные — г/т.

Вулканогенно-осадочные руды Холоднинского и Озерного месторождений отлагались в депрессионных структурах дна морского бассейна. Образование сульфидного осадка происходило хемогенным путем из придонного высококонцентрированного рассола при относительно низких (<200 °C) температурах [1, 15]. Анализ строения рудных залежей на этих месторождениях показывает ритмичное отложение сульфидной массы. Начало рудных ритмов характеризуется максимальным выпадением сульфидов и постепенным уменьшением их к концу ритма. Сера этих сульфидов имеет утяжеленный изотопный состав [5, 24] и указывает на существенную роль в их образовании восстановленной серы морских вод и, следовательно, на дефицит эндогенной серы в рудообразующих растворах. О дефиците эндогенной серы и низкой ее активности в рудообразовании свидетельствуют также широкое развитие карбонатных форм железа (сидерита) на Озерном месторождении, высокая железистость сфалеритов на этих месторождениях (см. табл. 2). В связи с этим можно предположить, что сульфидные формы переноса элементов имели ограниченное распространение, а преобладали в основном хлоридные комплексы. Поэтому очевидно, что для хемогенного осаждения сульфидных осадков было необходимо дополнительное поступление в раствор сульфидной серы. Об участии в сульфидообразовании серы морской воды свидетельствует ее утяжеленный изотопный состав. В то же время устойчивый утяжеленный состав сульфидной серы и отсутствие отрицательных значений исключают возможности ее восстановления за счет бактериальной сульфатредукции и предполагают abiогенный характер восстановления, возможно, за счет углеродистого вещества, содержащегося в осадке [1]. Таким образом, образование сульфидной серы на границе раствор—осадок приводило к ритмичному хемогенному формированию сульфидного рудного осадка вблизи области отложения, что не способствовало массовому соосаждению элементов-примесей, как в случае резкого падения температуры при придонном гидротермальном образовании.

Некоторое увеличение содержания элементов-примесей в колчеданных рудах по сравнению с колчеданно-полиметаллическими на Холоднинском место-

рождении также может служить подтверждением зависимости содержания элементов-примесей в рудах от условий их образования. Дело в том, что формирование колчеданных руд, слагающих мощное линзовидное тело на северо-востоке первой рудной зоны, очевидно, происходило вблизи источника гидротермальных растворов, подобно современным рудным холмам, а колчеданно-полиметаллические руды отлагались на удалении от источника хемогенным путем из высококонцентрированных рассолов, заполняющих впадину морского дна. Подобная картина — более высокие содержания элементов-примесей в сульфидных осадках вблизи источника гидротермальных растворов, установлена Ю.А. Богдановым с соавторами во впадинах Красноморского рифта [31].

Условия образования руд также фиксируются и в геохимии отдельных рудных минералов, особенно в сфалерите, характеризующемся большой изоморфной емкостью, и в блеклой руде, отличающейся переменным составом. Так, сфалериты вулканогенных гидротермально-осадочных месторождений содержат примесь таллия, которая, вероятно, отражает низкотемпературные условия их формирования, и довольно высокие концентрации железа, которые обычно являются следствием дефицита сульфидной серы в растворах. Блеклые руды этих месторождений также обогащены железом. Сфалериты вулканогенных гидротермальных месторождений, как и руды в целом, характеризуются более широким набором элементов-примесей. Здесь наряду с повышенными содержаниями железа установлены устойчивые примеси кадмия, серебра и ртути, отражающие уже другие условия образования. В блеклых рудах этого типа месторождений также установлен более широкий спектр катионов (см. табл. 6).

Близкими аналогами вулканогенных гидротермальных месторождений можно рассматривать современные сульфидные образования Восточно-Тихоокеанского поднятия, Срединно-Атлантического хребта и рифтового хр. Хуан-де-Фука, а вулканогенно-осадочных — сульфидные осадки впадин Атлантик II, Дискавери, Тетис и других в Красноморском рифте, детально описанные в работах российских исследователей [31—34] и многих зарубежных авторов [35—37]. Из древних аналогов к первой группе можно отнести многие колчеданные месторождения Урала, вулканогенные месторождения массивных сульфидных руд Австралии, японские месторождения типа куроко, а ко второй группе месторождения Раммельсберг, Мегген в Германии, Маунт-Айза, Брокин-Хил в Австралии, Бесси в Японии и многие другие [38—43].

Данные, приведенные в [44] по 67 технологическим пробам 32 колчеданных месторождений Урала, показывают достаточно широкий спектр элементов-примесей (табл. 7), близкий к рассматриваемым нами вулканогенным гидротермальным месторождениям. Такая же картина представлена [34] по массивным рудам современных океанических проявлений долины Миддл-Вэли и других районов хр. Хуан-де-Фука. В то же время в рудах гидротермально-осадочных месторождений Раммельсберг и Мегген [45, 46] отмечается ограниченное содержание элементов-примесей. Также невысокие величины элементов-примесей установлены Ю.А. Богдановым с соавторами в верхней и нижней сульфидных зонах впадины Атлантик II Красноморского рифта. Эти данные хорошо согласуются с нашими результатами по гидротермально-осадочным месторождениям.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Вулканогенные колчеданно-полиметаллические месторождения, развитые на территории Сибири и характеризующиеся близостью минеральных парагенезисов и состава руд, различаются как по источникам рудного вещества, так и по моделям их образования. Месторождения вулканогенного гидротермального типа (Юбилейное, Корбалихинское, Захаровское, Кызыл-Таштыг) генетически связаны с базальт-риолитовым вулканизмом и имеют сложную мантийно-коровую природу рудно-магматических систем, а гидротермально-осадочные месторождения (Холоднинское, Озерное), образовавшиеся в связи с базальтоидным вулканизмом, связаны с существенно глубинными мантийными источниками рудно-магматических систем.

Изучение распределения элементов-примесей в рудах и рудных минералах вулканогенного гидротермального и вулканогенного гидротермально-осадочного типов колчеданно-полиметаллических месторождений Сибири показало их существенное различие по спектру элементов и их содержаниям.

Набор элементов-примесей и уровни их концентраций в рудах колчеданно-полиметаллических месторождений зависят от их условий образования, определяющими из которых являются механизм отложения рудного вещества и физико-химические условия его формирования.

Повышенные концентрации элементов-примесей в рудах вулканогенных гидротермальных месторождений связаны, прежде всего, со спецификой формирования этих руд в условиях резкого падения температуры (вскипание растворов, смешение с морской водой), вызывающего массовое выпадение рудного вещества и соосаждение сопутствующих элементов, включая сорбционный захват кристаллизующимися сульфидными минералами.

Низкие концентрации элементов-примесей в рудах вулканогенно-осадочных месторождениях, напротив, обязаны спокойному ритмичному формированию хемогенных рудных образований из гидротер-

мальных рассолов морских впадин. Дефицит эндогенной серы и в связи с этим процесс восстановления и постепенного вовлечения в сульфидообразование серы морской воды исключали быстрое по времени массовое осаждение сульфидов и соответственно захват и соосаждение сопутствующих элементов.

Работа выполнена при поддержке гранта „Ведущие научные школы“ (НШ-1573.2003.5) и грантов РФФИ № 02-05-64792; 04-05-64399.

ЛИТЕРАТУРА

1. **Дистанов Э.Г., Ковалев К.Р., Тарасова Р.С. и др.** Холоднинское колчеданно-полиметаллическое месторождение в докембрии Прибайкалья. Новосибирск, Наука, 1982, 207 с.
2. **Гаськов И.В., Дистанов Э.Г., Миронова Н.Ю., Чекалин В.М.** Колчеданно-полиметаллические месторождения верхнего девона северо-западной части Рудного Алтая. Новосибирск, Наука, 1991, 121 с.
3. **Ковалев К.Р., Бусленко А.И.** Гидротермально-осадочный рудогенез и полиметаморфизм руд Озернинского рудного узла (Западное Забайкалье). Новосибирск, Наука, 1992, 212 с.
4. **Кузубный В.С., Макаров В.А., Калеев Е.А. и др.** Кызыл-Таштыгский колчеданно-полиметаллический рудный узел Восточной Тувы. Красноярск, ООО „Поликом“, 2001, 292 с.
5. **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.
6. **Ковалев К.Р., Дистанов Э.Г., Аношин Г.Н. и др.** Золото и серебро в рудах вулканогенных гидротермальных и гидротермально-осадочных колчеданно-полиметаллических месторождений Сибири // Геология и геофизика, 2004, т. 45, № 10, с. 1171—1185.
7. **Гаськов И.В., Дистанов Э.Г., Ковалев К.Р., Акимцев В.А.** Золото и серебро в полиметаллических месторождениях северо-западной части Рудного Алтая // Геология и геофизика, 2001, т. 42, № 6, с. 900—916.
8. **Зайков В.В.** Вулканизм и сульфидные холмы палеоокеанических окраин (на примере колчеданосных зон Урала и Сибири). М., Наука, 1991, 204 с.
9. **Гаськов И.В., Миронова Н.Ю., Перцева А.П.** Геохимия руд колчеданно-полиметаллических месторождений северо-западной части Рудного Алтая // Геология и геофизика, 1988, № 6, с. 100—109.
10. **Берман Б.И.** Геология Кызыл-Таштыгского месторождения // Труды регионального совещания по развитию производительных сил Тувинской АО. Новосибирск, 1960, с. 137—146.
11. **Ковалев К.Р.** Особенности формирования и метаморфизм руд колчеданно-полиметаллических месторождений Салаира и Тувы // Геология и геофизика, 1966, № 9, с. 23—35.
12. **Дистанов Э.Г.** Колчеданно-полиметаллические месторождения Сибири. Новосибирск, Наука, 1977, 349 с.
13. **Конкин В.Д., Ручкин Г.В., Кузнецова Т.П.** Холоднинское свинцово-цинково-колчеданное месторождение в Северном Прибайкалье (Восточная Сибирь) // Геология рудных месторождений, 1993, № 1, с. 3—15.
14. **Дистанов Э.Г., Ковалев К.Р.** Холоднинское стратиформное колчеданно-полиметаллическое месторождение // Месторождения Забайкалья, Т. 1. М., Геоинформарк, 1995, с. 83—93.
15. **Гаськов И.В.** Колчеданно-полиметаллическое и полиметаллическое оруденение Олоkitской структурно-металлогенической зоны и его геохимические особенности: Автореф. дис. ... канд. геол.-мин. наук. Новосибирск, ИГиГ СО АН СССР, 1982, 16 с.
16. **Тарасова Р.С., Близнюк М.В., Бабкин И.Н.** О формационном типе и генезисе свинцово-цинкового колчеданного месторождения Озерное // Геология и генезис эндогенных рудных формаций Сибири. Новосибирск, Наука, 1972, с. 78—91.
17. **Дистанов Э.Г., Ковалев К.Р., Тарасова Р.С.** Геологическое строение и генезис Озерного свинцово-цинкового колчеданного месторождения (Западное Забайкалье) // Геология рудных месторождений, 1972, № 2, с. 3—22.
18. **Дистанов Э.Г., Ковалев К.Р.** Текстуры и структуры гидротермально-осадочных колчеданно-полиметаллических руд Озерного месторождения. Новосибирск, Наука, 1975, 195 с.
19. **Баранов В.Д.** Первичная зональность оруденения и распределение редких элементов в полиметаллических месторождениях Зырянского рудного района // Редкие элементы в сульфидных месторождениях. М., Изд-во АН СССР, 1963, с. 230—247.
20. **Литвинович А.Н.** К геохимии Лениногорского района // Геохимия, магматизм и металлогения Рудного Алтая. Алма-Ата, 1966, с. 98—109.
21. **Инин В.Д., Литвинович А.Н.** Элементы-спутники Глубочанских залежей Белоусовского месторождения Алтая // Там же, с. 125—141.

22. **Беспаяев Х.А., Николаев Л.Г., Ганженко Г.Д., Тойбазаров М.А.** Колчеданно-полиметаллические месторождения Прииртышского района. Алма-Ата, Наука, 1988, 246 с.
23. **Беспаяев Х.А., Полянский Н.В., Ганженко Г.Д. и др.** Геология и металлогения Юго-Западного Алтая. Алматы, „Гылым“, 1997, 284 с.
24. **Дистанов Э.Г., Гаськов И.В., Гриненко Л.Н., Перцева А.П.** Изотопный состав серы руд и пород Холоднинского колчеданно-полиметаллического месторождения // Геология и геофизика, 1988, № 7, с. 60—69.
25. **Ротараш И.А., Самыгин С.Г., Гредюшко Е.А. и др.** Девонская активная континентальная окраина на Юго-Западном Алтае // Геотектоника, 1982, № 1, с. 44—59.
26. **Ковалев К.Р.** Гидротермально-осадочный рудогенез на колчеданно-полиметаллических месторождениях Забайкалья и преобразование руд при различных типах метаморфизма: Автореф. дис. ... д-ра геол.-мин. наук. Новосибирск, ОИГТМ СО РАН, 1994, 95 с.
27. **Лисицын А.П., Богданов Ю.А., Гурвич Е.Г.** Гидротермальные образования рифтовых зон океана. М., Наука, 1990, 256 с.
28. **Богданов Ю.А.** Систематика современных сульфидных залежей дна океана // Геология рудных месторождений, 2000, т. 42, № 6, с. 499—512.
29. **Таусон В.Л., Бессарабова О.И., Кравцова Р.Г. и др.** О разделении форм нахождения золота в пиритах путем исследования статистических выборок аналитических данных // Геология и геофизика, 2002, т. 43, № 1, с. 57—67.
30. **Таусон В.Л., Пархоменко И.Ю., Меньшиков В.И., Непомнящих К.В.** О механизме захвата растущими кристаллами несовместимых элементов // Геология и геофизика, 2002, т. 43, № 2, с. 182—187.
31. **Богданов Ю.А., Гурвич Е.Г., Бутузова Г.Ю. и др.** Металлоносные осадки Красного моря. М., Наука, 1986, 287 с.
32. **Лисицын А.П., Богданов Ю.А., Мурдмаа И.О. и др.** Металлоносные осадки и их генезис // Геолого-геофизические исследования в юго-восточной части Тихого океана. М., Наука, 1976, с. 289—379.
33. **Краснов С.Г., Черкашев Г.А., Айнемер А.И. и др.** Гидротермальные сульфидные руды и металлоносные осадки океана. СПб., Недра, 1992, 278 с.
34. **Краснов С.Г., Степанова Т.В.** Формирование крупной океанской колчеданной залежи (Миддл-Вэлли, хр. Эндовор) по данным геохимических исследований керна // Геохимия, 1996, № 9, с. 852—874.
35. **Бишофф Дж.** Осадки гидротермальных рассолов Красного моря (минералогия, химия и генезис) // Современное гидротермальное рудоотложение. М., Мир, 1974, с. 157—193.
36. **Scott S.D., Yang K.** Massive sulfide-forming systems on the present ocean floor // Miner. Deposits, Balcema. Rotterdam, 1997, p. 19—25.
37. **Hannington M.D., Tivey M.K., Larocque A.C. et al.** The occurrence of gold in sulfide deposits of the TAG hydrothermal field, Mid-Atlantic Ridge // Canad. Miner., 1995, v. 33, part 6, p. 1285—1310.
38. **Франклин Дж.М., Лайдон Дж.У., Сангстер Д.Ф.** Колчеданные месторождения вулканической ассоциации // Генезис рудных месторождений, Т. 2. М., Мир, 1984, с. 39—252.
39. **Large Ross R.** Australian volcanic-hosted massive sulfide deposits: features, styles and genetic models // Econ. Geol., 1992, v. 87, p. 471—510.
40. **Halbach P., Pracejus B., Marten A.** Geology and mineralogy of massive sulfide ores from the central Okinawa trough, Japan // Econ. Geol., 1993, v. 88, № 8, p. 2210—2225.
41. **Solomon M., Sun S-s.** Earth's evolution and mineral resources, with particular emphasis on volcanic-hosted massive sulphide deposits and banded iron formations // AGSO J. Australian Geobgy Geophysics, 1997, v. 17, № 1, p. 33—48.
42. **Еремин Н.И., Дергачев А.Л., Сергеева Н.Е., Позднякова Н.В.** Типы колчеданных месторождений вулканических ассоциаций // Геология рудных месторождений, 2000, т. 42, № 2, с. 177—190.
43. **Зайков В.В., Масленников В.В., Зайкова Е.В., Херрингтон Р.** Рудно-формационный и рудно-фациальный анализ колчеданных месторождений Уральского палеоокеана. Миасс, Ин-т минералогии УО РАН, 2002, 314 с.
44. **Вострокнутов Г.А.** Геохимические особенности руд // Медно-колчеданные месторождения Урала. Екатеринбург, 1992, с. 119—121.
45. **Sperling H.** Das Neuer Lager der Blei-Zink-Erzlagerstätte Rammelsberg . Hannover, 1986, H. 85, 180 p.
46. **Минеральные месторождения Европы**, Т. 3. М., Мир, 1988, 516 с.