



УДК (553.311+553.3/.4):(551.46:553.2)

СУЛЬФИДНО-МАГНЕТИТОВЫЕ РУДЫ СКЛАДЧАТЫХ ОБЛАСТЕЙ – ВОЗМОЖНЫЕ АНАЛОГИ СОВРЕМЕННЫХ ОКЕАНИЧЕСКИХ СУЛЬФИДНЫХ ОБРАЗОВАНИЙ

Э. Г. Кассандров

Сибирский НИИ геологии, геофизики и минерального сырья, Новосибирск

На основе анализа тектонического положения и обстановок рудообразования, особенностей магматизма, состава руд и их ресурсов показаны элементы сходства и различия между сульфидно-магнетитовыми, колчеданно-полиметаллическими месторождениями континентов и современными сульфидными рудами океанов. Те и другие образовались за счет глубинного магматического источника рудного вещества в стадию растяжения земной коры. Обращает на себя внимание поразительное сходство и выдержанность состава главных типоморфных сульфидных минералов и химических элементов (Fe, Zn, Cu) по всей цепочке процесса образования месторождений. Сульфидно-магнетитовые руды в вулканогенно-осадочных толщах складчатых областей рассматриваются как звено в эволюционном ряду месторождений колчеданного семейства в сторону оксидных месторождений железа и марганца. Приведенный материал расширяет круг закономерностей пространственного нахождения и образования как железорудных, так и колчеданно-полиметаллических месторождений.

Ключевые слова: сульфидно-магнетитовые месторождения, колчеданно-полиметаллические месторождения, океанские сульфидные образования.

SULPHIDE-MAGNETITE ORES OF FOLDED AREAS AS POSSIBLE ANALOGUES OF CURRENT OCEANIC SULPHIDE FORMATIONS

E. G. Kassandrov

Siberian Research Institute of Geology, Geophysics and Mineral Resources, Novosibirsk

Based on analysis of tectonic position and mineralization environments, features of magmatism, ore composition and resources, the author discusses the similarities and differences between sulphide-magnetite and pyrites-polymetallic deposits in the continents and current sulphide ores in the oceans. Both derived from deep magmatic source of ore matter during the Earth's crust extension period. Notable is the striking similarity and even composition of the main typomorphic sulphide minerals and chemical elements – Fe, Zn, and Cu – throughout deposit formation. Sulphide-magnetite ores in igneous-sedimentary rocks in folded areas are considered to be part of the evolutionary row of pyrites deposits toward ferrum and manganese oxide ones. The data provided widen the formation and location pattern of both iron-ore and pyrites-polymetallic deposits.

Keywords: sulphide-magnetite, pyrites-polymetallic deposits, oceanic sulphide formations.

DOI 10.20403/2078-0575-2016-3-123-134

Сульфидно-магнетитовые месторождения гидросиликатно-скарновой формации в России являются сырьевой базой для действующих и проектируемых металлургических заводов Урала и Сибири. Как тип они были выделены еще в 1931 г., когда М. А. Усов показал, что количество цинка в железных рудах месторождения Темиртау сопоставимо с таковым на Салаирском месторождении полиметаллических руд, которое планировалось для снабжения Беловского цинкового завода. Месторождения формировались на протяжении длительного времени – от архея до верхнего палеозоя. Обладают запасами и прогнозными ресурсами от нескольких десятков миллионов до нескольких миллиардов тонн. Характерная их особенность – сосредоточение компактными группами на площади не более 20×30 км². Протяженность месторождений в плане достигает 18 км (Десовское) при суммарной мощности рудных тел от десятков до 100 м и более. Среднее содержание железа в рудах 30–50 %. Руды прослеживаются бурением на глубину до 2300 м без выклинивания

(Таштагольское месторождение). Месторождения стратиформные, имеют рудные тела преимущественно пластообразной и линзообразной формы, залегают согласно с вмещающими вулканогенно-осадочными породами, ассоциируют с субмаринными отложениями, в которых заметна или велика роль карбонатных пород. Имеются тела более сложной формы – штокверковой, жильной и др. Иногда отмечается прямая зависимость масштаба месторождений от мощности, состава и условий образования рудовмещающей пачки.

Для крупных месторождений характерны размещение разноформационного оруденения (вулканогенно-осадочного, гидротермально-метасоматического и магматического) и достаточно длительное сохранение стабильных тектонических условий и поступления рудного вещества из магматического очага и других источников при их формировании. В Алтае-Саянской складчатой области месторождения контролируются крупными, протяженностью в сотни километров, зонами разломов и смятия,

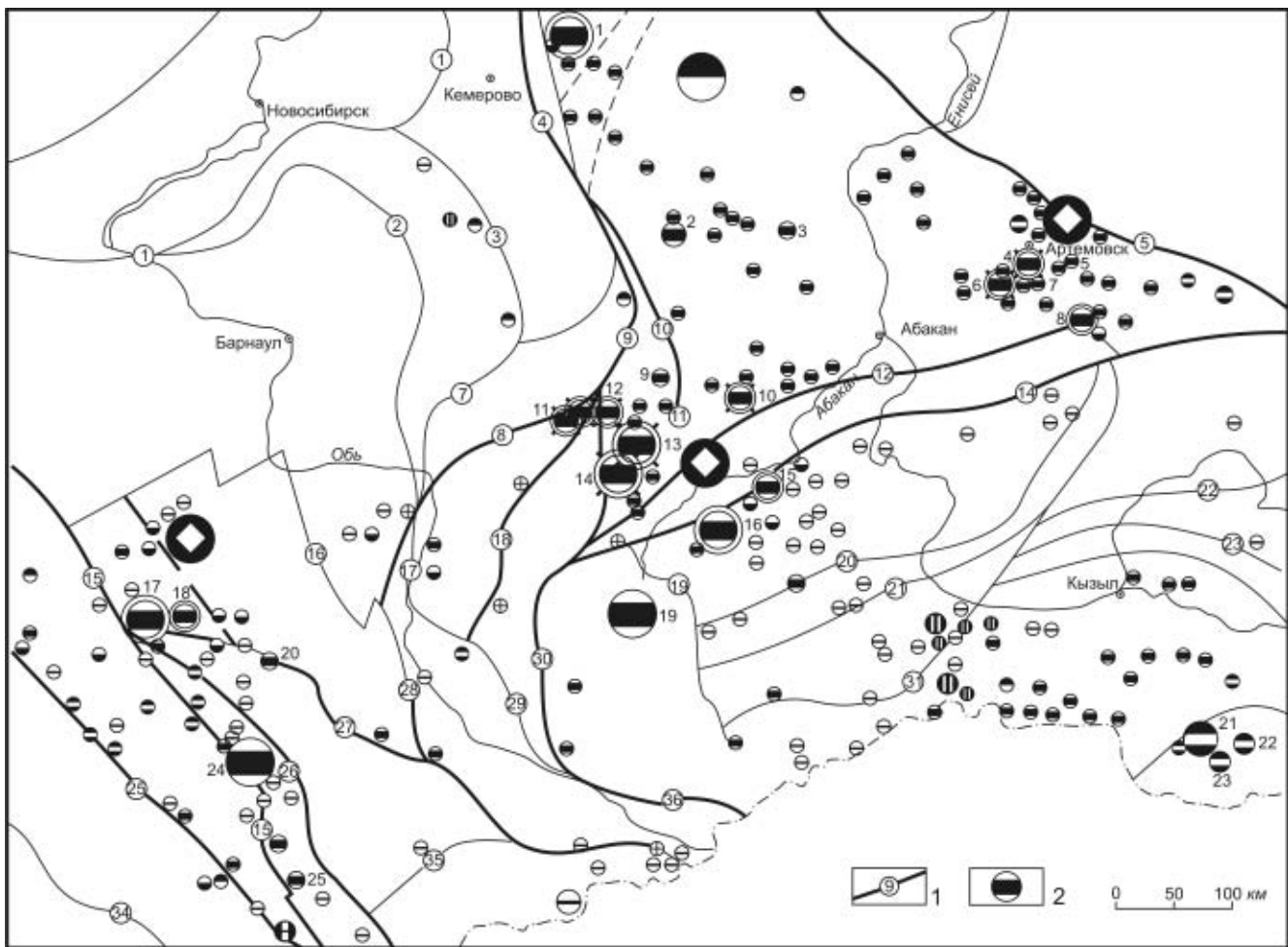


Рис. 1. Схема размещения железорудных месторождений Алтае-Саянской складчатой области (структурно-тектоническая основа по В. С. Суркову и др., 1976)

1 – главные разломы: 4 – Тайдонский, 5 – Восточно-Саянский, 8 – Бийско-Ташелгинский, 9 – Кондомско-Лебедской, 10 – Терсинский, 14 – Кандайский, 15 – Белоубинский, 18 – Сейский, 25 – Иртышская зона смятия, 26 – Северо-Восточная зона смятия, 27 – Чарышско-Теректинский, 30 – Телецкий, 36 – Курайский; 2 – сульфидно-магнетитовые месторождения скарново-гидросиликатной формации: 1 – Ампалыкское, 2 – Терсинская гр., 3 – Самсон, 4 – Краснокаменское, 5 – Тереховское, 6 – Ирбинское, 7 – Бурлукское, 8 – Табратское, 9 – Ташелгинское, 10 – Тейское и Абагасское, 11 – Сухаринское, 12 – Казское, 13 – Шерегешевское, 14 – Таштагольское, 15 – Абаканское, 16 – Анзасское, 17 – Белорецкое, 18 – Инское, 19 – Волковское, 20 – Тимофеевское, 21 – Холзунское, 22 – Родионов Лог

вдоль которых располагались древние центры магматизма, непосредственно влиявшие на образование рудоносных вулканогенно-осадочных формаций (рис. 1). Выделяются два стратиграфических уровня формирования рудоносных формаций: $V-E_2$ – месторождения Горной Шории, Кузнецкого Алатау, Саян, Забайкалья (вулканизм риолит-базальтовой формации); D_1-D_2 – Холзунское, Инское, Белорецкое месторождения Алтая (вулканизм субщелочной базальт-риолитовой формации). На первом уровне месторождения образовались в геодинамической обстановке вулканических островных дуг и задуговых бассейнов, на втором – активных континентальных окраин и рифтогенных прогибов. В центральных частях многих рудных узлов находятся крупные интрузивные массивы, что свидетельствует о наличии длительно развивавшихся очаговых структур. Отметим, что сульфидно-магнетитовые месторождения гидросиликатно-скарновой формации не встречаются

в толщах без вулканогенных пород и вне ареалов вулканизма. Рудные тела формируются в периоды затишья активного вулканизма, смены основности – щелочности в вулканитах и повышения в них количества калия. Месторождения связаны с определенными геологическими формациями и фациями, рудоносные пачки подчинены ритмичной стратификации.

Характерна связь месторождений с вулканоплутоническими андезито-диоритовой, андезит-базальт-габбровой, андезит-трахит-сиенитовой, риолит-кератофир-сиенитовой (плагιοгранитной) повышенной щелочности ассоциациями. Сопровождающие руды метасоматиты представлены известковыми и магнезиальными скарнами, гидросиликатовыми и альбит-скаполитовыми породами. Месторождения нами рассматриваются как метаморфизованные первично вулканогенно-осадочные [4], которые образовались на ранних этапах развития вулканических острово-



дужных систем и континентальных рифтов при базальтовом источнике рудного вещества.

Главные сульфидные минералы, сопутствующие магнетиту в рудах, – пирит, пирротин, сфалерит, халькопирит. Реже и в меньших количествах встречаются золото, серебро, галенит, арсенопирит, висмутин, манганосидерит, борнит, ковеллин, кобальтин и др. Сульфидная минерализация присутствует в виде вкрапленности, гнезд, линз, прослоев, в том числе ритмично чередующихся с магнетитовыми слоями в полосчатых рудах, и крупных залежей, расположенных согласно с магнетитовыми рудами. Например, на Ирбинском месторождении залежь массивных сульфидов мощностью 50 м прослежена на расстояние 250 м. Сложена пиритом, пирротинном, халькопиритом, в меньшем количестве галенитом и сфалеритом. На месторождении Темиртау мощность линзы сульфидов достигает 3 м. Они содержат, кроме пирита, до 22,75 % сфалерита. На Шерегешевском месторождении (участок Болотный) в сульфидно-магнетитовых рудах содержание цинка достигает 13,98 %. Залежи массивных сульфидов известны также на Сухаринском и Казском месторождениях. По диапазону содержаний серы месторождения Тельбесско-Казского рудного поля, согласно исследованиям В. И. Иванова, делятся на две группы: первая – 0–29 %, в среднем 4,13–7,99 % (Левосухаринское, Центральные, Северо-Восточные и Юго-Западные Штоки); вторая – 0–17 %, в среднем 2,5–3,8 % (Медвежьи Штоки, Темиртау, Леспромхозное). При этом руды разных месторождений имеют четкие ограничивающие содержания, одинаковые по группам: в первой группе 0 и 27 %, во второй – 0 и 15 %.

Приведем некоторые примеры высоких концентраций отдельных компонентов в сульфидно-магнетитовых рудах. На месторождении Темиртау скв. 29 в инт. 149,5–156,0 м вскрыта руда, содержащая 22,75 % сфалерита, 16,62 % пирита и 12 % магнетита. Наиболее высокие содержания пирита отмечаются в рудах участка Юго-Западные Штоки (48,2 % в скв. 324, инт. 150,7–154,2 м); Северо-Восточные Штоки (29,34 % в скв. 98); Леспромхозного (22,8 % в скв. 393); Медвежьи Штоки (17,42 % в скв. 280; 24,75 % в скв. 285). Кроме высокого содержания в рудах цинка (до 19,0 %) присутствуют медь до 1,02, свинец до 1,03, мышьяк до 0,97 %. Золото встречается постоянно, но особо повышено его содержание в 6-м рудном теле Казского месторождения: 2,9 г/т (в среднем 0,9 г/т); запасы 6,6 т. Кроме того, концентрация серебра здесь 48 г/т, в среднем 14,9 г/т. Содержания серы, железа, цинка, меди, кобальта, свинца, золота, серебра и других элементов в железных рудах и сульфидных концентратах приведены по результатам технологических исследований рядовых, групповых, лабораторных и полупромышленных проб, выполненных в различных специализированных организациях СССР и РФ.

Приведенные необычно высокие средние и фоновые содержания серы по всем без исключения участкам и месторождениям Тельбесско-Казского рудного поля ставят под сомнение правомерность принятого генезиса и особенно источника рудного вещества за счет контактового или ореольно-метасоматического происхождения гидросиликатно-скарновых магнетитовых месторождений складчатых областей. Руды, анализы которых приведены выше, состоящие почти на 40 % из сульфидов цинка и железа или на 48 % из пирита (при фоновом содержании серы около 2 %), следует квалифицировать как колчеданные и сопоставлять с рудами колчеданно-полиметаллических месторождений, например Озернинского рудного узла в Бурятии, как фацию сульфидно-окисных руд [7].

При разведке залежи сульфидов на железорудных гидросиликатно-скарновых месторождениях не оконтуривались по флангам и на глубину, поэтому истинные их масштабы не выявлены. В сульфидно-магнетитовых рудах складчатых областей Сибири установлены следующие содержания компонентов (%): серы 1,04–29,0, в сульфидном концентрате 29–50,6; меди 0,036–1,2, в сульфидном концентрате 17,4–27,6; цинка 0,13–13,98, в сульфидном концентрате 47,1–56,3; кобальта 0,014–0,28, в пиритно-кобальтовом концентрате 0,12–0,60; в пиритах – до 1,6, в арсенопиритах до 2,06; марганца в рудах от десятых долей до 2; золота до 7,2 г/т в рудах, 0,66 г/т в пирите; серебра до 14,9 г/т. Прогнозные ресурсы и запасы категории С₂ этих элементов по месторождениям сульфидно-магнетитовых руд составили (тыс. т): серы 640–10620, меди 40–1150, цинка 20–1500, кобальта 7,5–80, марганца 375–8650; золота до 62,5 т, серебра до 308 т. Всего учтено 33 эксплуатирующихся и резервных разведанных месторождения Алтае-Саянской и Байкальской складчатых областей, Алданского щита [5]. Наиболее достоверны сведения для эксплуатируемых и лучше разведанных месторождений АССО.

Общей характерной чертой анализируемых месторождений сульфидно-магнетитовых руд является постоянное присутствие главных после железа и серы элементов – *цинка* и *меди*, количество которых достигает значений, характерных для крупных и средних месторождений [5]. Это не зависит от того, с каким петрографическим типом интрузий генетически их связывают сторонники контактово-метасоматической гипотезы образования железорудных месторождений – габброидными, гранитоидными или гранит-сиенитовыми.

Гидросиликатно-скарновые сульфидно-магнетитовые месторождения железорудных провинций Сибири можно квалифицировать **как кобальт-медно-цинковые золотоносные** (Алтае-Саянская) с небольшим присутствием Mn, Ag, Pb, В, V, Mo, Bi, As, Ni, Cr, P, W и др.; **свинец-медно-цинковые** (Забайкальская) с заметным присутствием в отдельных случаях Mn, V, W, Ba и небольшим количеством

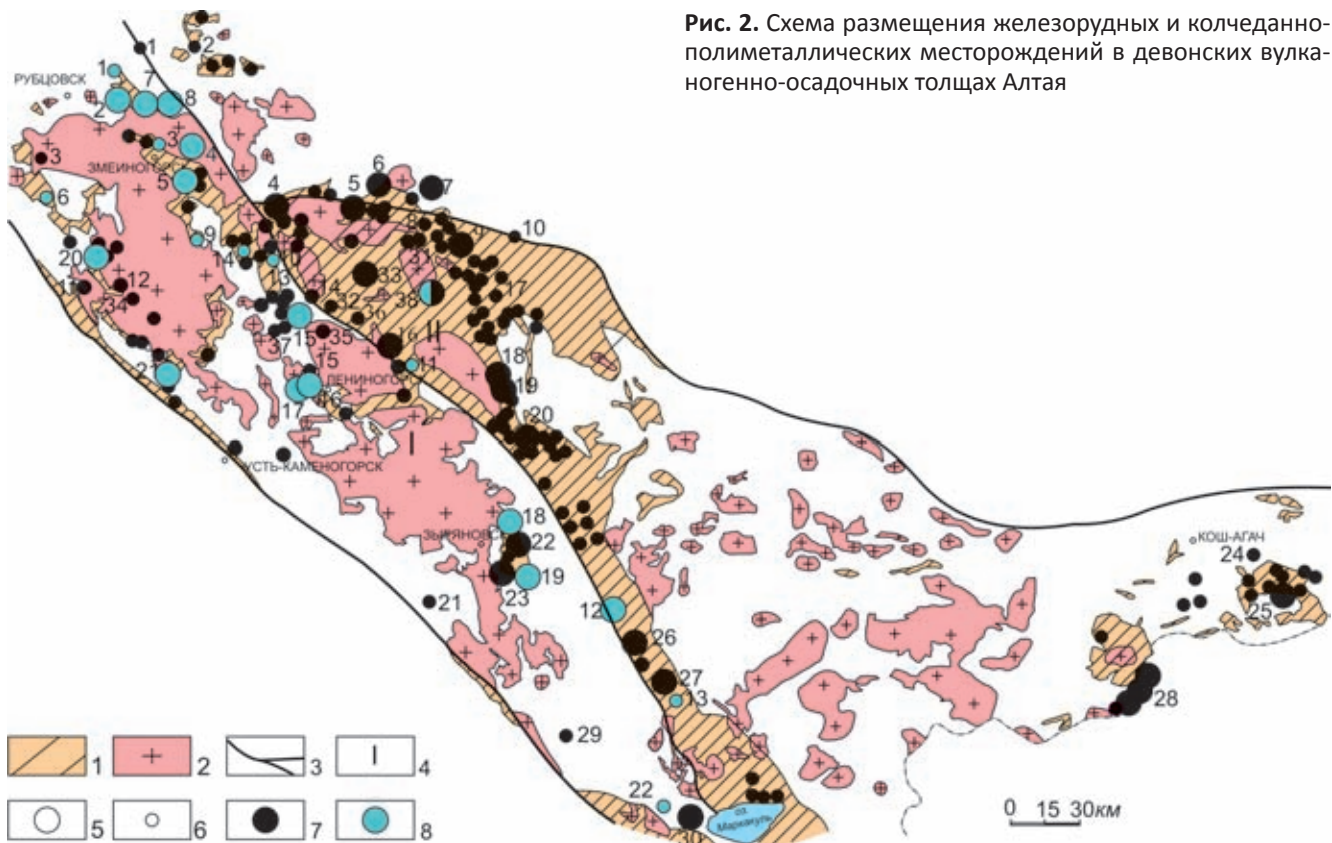


Рис. 2. Схема размещения железорудных и колчеданно-полиметаллических месторождений в девонских вулканогенно-осадочных толщах Алтая

1 – вулканогенно-осадочные отложения D_{1-2} ; 2 – интрузии гранитоидов; 3 – главные разломы и зоны смятия; 4 – металлогенические пояса: I – Рудно-Алтайский колчеданно-полиметаллический, II – Горно-Алтайский железорудный; 5 – месторождения; 6 – рудопоявления; 7 – железорудные: 1 – Кузнецовское, 2 – Новознаменское, 3 – Луговское, 4 – Белорецкое, 5 – Инское, 6 – Рубежное, 7 – Чесноковское, 8 – Викторов Лог, 9 – Коргонское, 10 – Куминское, 11 – Сурнинское, 12 – Глинковское, 13 – Магнитное, 14 – Абрамихинское, 15 – Таловское, 16 – Чесноковское I, 17 – Кедровское, 18 – Коксинские II и III, 19 – Кульдинский рудный узел, 20 – Холзунское, 21 – Бухтарминское, 22 – Богатыревское, 23 – Зыряновское, 24 – Красная горка, 25 – Рудный Лог, 26 – Коробихинское, 27 – Родионов Лог, 28 – Калгутинский узел, 29 – Кок-Тас, 30 – Маркакульское, 31 – Кристальное, 32 – Польшовское, 33 – Теремковское, 34 – Белый камень, 35 – Медвежихинское, 36 – Левобережное, 37 – Сакмарихинское, 38 – Раскатинское; 8 – колчеданно-полиметаллические: 1 – Захарьевское, 2 – Рубцовское, 3 – Майское, 4 – Корбалихинское, 5 – Змеиногорское, 6 – Золотушинское, 7 – Таловское, 8 – Степное, 9 – Осеннее, 10 – Чекмарь, 11 – Старковское, 12 – Тенихинско-Ермиловское, 13 – Никитинское, 14 – Сакмарихинское, 15 – Стрежное, 16 – Риддер-Сокольное, 17 – Тишинское, 18 – Зыряновское, 19 – Мурзинцевское, 20 – Николаевское, 21 – Березовско-Белоусовское, 22 – Маркакульское

Au, Ag, Mo и др.; **кобальт-медные бороносные** (Алданская) с небольшим количеством примесей Zn, Au, Ag и др.

Сульфидно-магнетитовые месторождения и рудные тела в некоторых рудных районах пространственно и парагенетически связаны с колчеданно-полиметаллическими. Например, на Алтае выделяются колчеданно-полиметаллический и железорудный пояса, граничащие друг с другом и имеющие много общего в геологическом строении и закономерностях размещения месторождений, в том числе отмечено их одновременное присутствие (рис. 2). В рудном поле Зыряновского колчеданно-полиметаллического месторождения на Пригородном, Тигинском и Богатыревском участках по скважинам и редким коренным выходам в нижней части разреза вулканогенно-осадочной ревнюхинской свиты D_{1-2} выявлен железорудный горизонт протяженностью более 7 км при средней мощности залежи магнетит-гематитовых руд 7,3 м (рис. 3). Со-

держание железа в рудах колеблется от 17 до 53 %, в среднем 22 %. Часто в заметном количестве отмечается пирит, реже халькопирит и галенит. Выше по разрезу свиты залегают колчеданно-полиметаллические руды зыряновского рудного узла (см. рис. 3). К северо-востоку от Лениногорска в Холзунско-Сарымсактинской структурно-формационной зоне Рудного Алтая открыты крупное Теремковское проявление гидросиликатно-скарновых магнетитовых руд, аналогичных рудам Холзунского месторождения, и Польшовское проявление медьсодержащих кремнисто-магнетит-гематитовых руд. В Риддер-Сокольном рудном узле известно Таловское магнетит-гематитовое проявление. В южной части колчеданно-полиметаллического пояса Рудного Алтая находится сульфидно-магнетитовое месторождение Родионов Лог, сопоставимое по запасам с некоторыми месторождениями Горной Шории (см. рис. 2). Все они залегают среди ниже-среднедевонских вулканогенно-осадочных отложений стратиграфи-

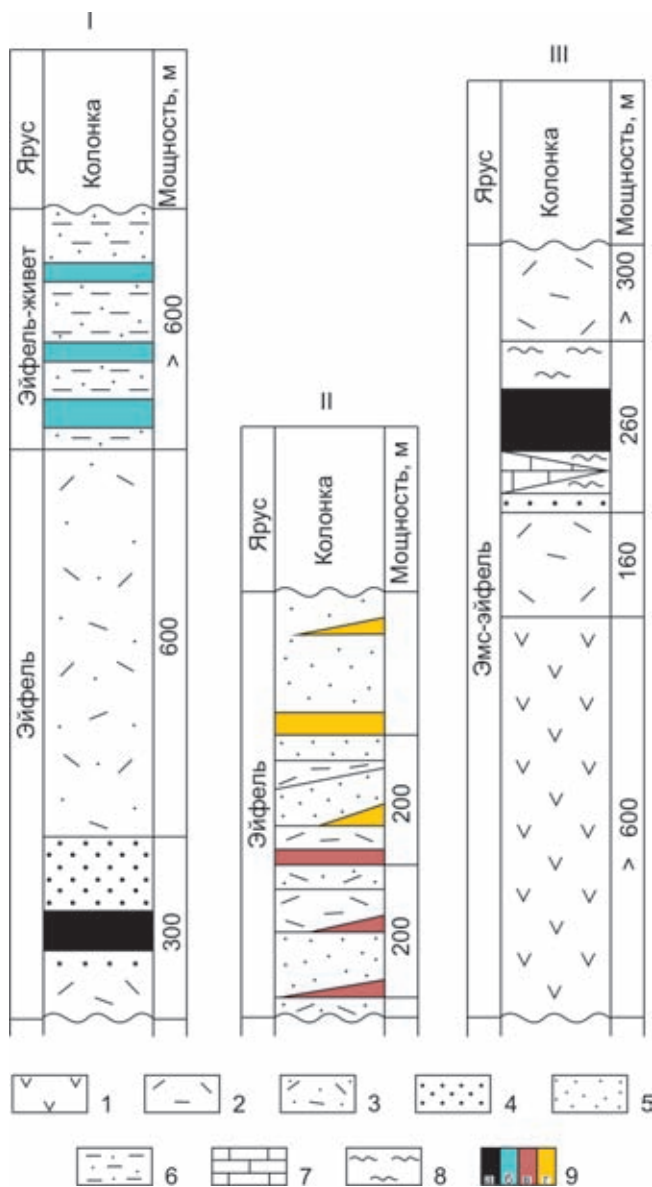


Рис. 3. Схематические литолого-стратиграфические колонки месторождений

1 – трахиандезиты, трахидациты, кластолавы, туфы, прослои туффилов; 2 – липариты, трахилипариты, туфы, игнимбриты, прослои туффилов; 3 – туфы кислого состава; 4 – туффы грубообломочные, крупнозернистые; 5 – туфопесчаники, песчаники, известковистые песчаники; 6 – алевриты, известково-глинистые, углистые сланцы; 7 – известняки; 8 – сланцы серицитовые, хлоритовые, амфиболовые, биотитовые; 9 – руды: железные, в кровле залежи Холзунского месторождения – цинксодержащие (а), колчеданно-полиметаллические (б), железомарганцевые и марганцево-железные (в), марганец-железо-свинцово-цинковые (г); месторождения: I – Зырянское (по В. Г. Пономареву), II – Раскатинское (по Ю. В. Робертусу), III – Холзунское (по Э. Г. Кассандрову)

чески ниже колчеданно-полиметаллических руд. Таким образом, железорудный горизонт на территории Рудно-Алтайского пояса, как и соседнего Горно-Алтайского, является маркирующим. Многочисленные проявления железных руд встречаются и в северо-западной части Рудно-Алтайского пояса – Сурьинское, Глинковское, Белый Камень, Магнитное и др. (см. рис. 2).

На месторождениях обоих поясов существует четко выраженная вертикальная по разрезу и латеральная рудная зональность. Например, в нижне-среднедевонских отложениях Холзунско-Инской железорудной зоны Горного Алтая в подошве разреза коргонской свиты среди относительно крупнозернистых вулканогенно-осадочных пород залегают гематитовые, магнетит-гематитовые и окисные марганцевые руды. В средней части свиты, где присутствуют более мелкообломочные и карбонатные литофации, находятся залежи сульфидно-магнетитовых и сульфидно-апатит-магнетитовых руд (Инское, Холзунское месторождения). На этом же уровне появляются свинцово-цинковое оруденение и карбонатные марганцевые руды. В пределах зоны установлена следующая вертикальная зональность оруденения снизу вверх по разрезу: Fe, Mn, Ba → Fe, V, P, Zn, Cu, Pb; латеральная с юго-востока на северо-запад: Fe, Mn → Fe, Mn, Ba → Fe, Cu, Zn, Pb [6]. На Раскатинском месторождении Ю. В. Робертусом установлена вертикальная зональность оруденения (стратиграфически снизу вверх): Mn → Fe, Mn → Fe → Zn, Pb (см. рис. 3). Месторождение находится в пределах железорудного пояса Горного Алтая, в 60 км к северо-востоку от Лениногорска. Оно протягивается на расстояние более 5 км, содержит около 30 рудных тел протяженностью от 50 до 1300 м, мощностью от 1,8 до 38 м. Преобладают магнетитовые и пирит-магнетитовые руды со средним содержанием (%) Fe 30,70, MnO 1,21, Pb 0,11, Ba 0,44. Далее следуют железомарганцевые руды со средним содержанием (%) Fe 15,2, Mn 22,42, Ba 0,50 и свинцово-цинковые со средним содержанием Pb+Zn 2,38 %. Месторождение обладает существенными прогнозными ресурсами железных, железомарганцевых и свинцово-цинковых руд.

Выделяются следующие общие металлогенические особенности колчеданно-полиметаллического и железорудного поясов на Алтае. За основу сопоставления взята металлогеническая схема Г. Н. Щербы и его соавторов [14].

1. Локализация в пределах девонских вулканогенно-осадочных толщ, большей частью D₁-D₂e-gv. Пространственная и генетическая связь с процессами девонского вулканизма, который представлен базальт-риолитовой контрастной формацией для месторождений колчеданно-полиметаллического пояса и субщелочной базальт-риолитовой для железорудного. Внутри поясов заметно преобладают вулканические породы риолитовой группы.

2. Большая роль Северо-Восточной и Иртышской зон смятия в качестве магмо- и рудоподводящих каналов.

3. Проявление оруденения на нескольких стратиграфических уровнях. Совместное присутствие полиметаллических и железных руд на первом (D₁₋₂) и втором (D₁₋₂e-gv) рудоносных уровнях.

4. Формирование месторождений в различных фациальных условиях – от существенно вулканиче-



ских континентальных (жерловых, прижерловых) до типично морских осадочных (мелководных и умеренных глубин).

5. Образование структурно-формационных зон, вмещающих колчеданно-полиметаллическое и железное оруденение, на месте вулканических островных дуг, палеорифтов и прибортовых частях рифтогенных впадин.

6. Одинаковая степень регенерации руд колчеданно-полиметаллических и железорудных месторождений: магматическая, гидротермально-метасоматическая, динамометаморфическая.

Классический пример взаимоотношений колчеданно-полиметаллических и сульфидно-магнетитовых месторождений и рудных тел представляет собой Озернинский рудный узел в Бурятии. На площади 10×15 км здесь расположено более десяти пространственно сближенных колчеданно-полиметаллических, сульфидно-магнетитовых, магнетитовых, магнетит-гематитовых и марганцево-железорудных месторождений, группирующихся вокруг крупного Озерного колчеданно-свинцово-цинкового, маргансидеритового месторождения. Среди них установлены взаимные переходы по простиранию рудоносной вулканогенно-осадочной олдындинской свиты раннекембрийского возраста, а также фациальные переходы рудных залежей и тел в пределах отдельных месторождений. На некоторых выявлен целый комплекс промышленных рудных залежей. Например, месторождение Солонго представляет собой промышленные залежи магнетитовых, сфалеритовых и борных руд, локализованных в удобной для селективной отработки серии последовательно перекрывающих друг друга пластообразных тел. Аришинское сульфидно-магнетитовое месторождение в структурном плане продолжает Озерное полиметаллическое месторождение. Предварительно оцененные запасы железа здесь составляют 135 млн т, прогнозные ресурсы 250 млн т. Их можно подразделить на два технологических типа: марганцевистые сидерит-магнетитовые и медно-магнетитовые.

Ю. А. Нуварьева и А. А. Сливинский для колчеданно-полиметаллических и железорудных месторождений Забайкалья обосновывают парагенетическую связь, выражающуюся в фациальной смене этих месторождений и однотипности литолого-фациальных, структурно-морфологических и геохимических характеристик [12]. К. Р. Ковалев и А. И. Бусленко выделяют три типа рудоносных литофаций для Озернинского рудного узла – существенно вулканогенные, вулканогенно-осадочные и туфогенно-терригенно-карбонатные, вмещающие соответственно железоокисное, сульфидно-железоокисное и сульфидное полиметаллическое оруденение. По отношению к источникам вулканизма первые относятся к проксимальным фациям и отражают более аэрированную обстановку, а вторые и третьи – к более удаленным дистальным фациям, рудоотложение в которых происходило в застойных условиях.

Генезис сульфидно-железоокисного и колчеданно-полиметаллического оруденения для Озернинского рудного узла они считают сингенетично-регенерационным, который включает гидротермально-осадочное накопление сульфидных и железоокисных руд в вулканогенно-осадочных толщах и преобразование их в условиях орогенеза и разновозрастной магматической деятельности [7].

Таким образом, высокие и повышенные содержания сульфидов цинка и меди во многих гидросиликатно-скарновых магнетитовых месторождениях АССО, Забайкалья, Урала, Алданского щита, ближнего и дальнего зарубежья не случайны, а представляют собой закономерное звено в эволюционном ряду месторождений колчеданного семейства, в данном случае в сторону окисных железомарганцевых месторождений.

Как известно, месторождения колчеданного семейства в вулканогенных провинциях по тектоническим, формационным признакам, составу и соотношению основных рудообразующих компонентов (меди, цинка и свинца) подразделяются на типы. По сульфидной составляющей сульфидно-магнетитовые руды можно отнести к уральскому и рудноалтайскому типам. Для первого характерна островодужная кора океанического типа, риолит-базальтовая рудоносная формация натрового профиля и цинково-медно-колчеданные руды; для второго – островодужная кора на переработанном континентальном субстрате, базальт-риолитовая рудоносная формация калиево-натрового профиля, колчеданно-полиметаллические руды с преобладанием цинковой составляющей. Следует отметить, что даже в пределах одного месторождения соотношение рудообразующих элементов может существенно меняться. Современными аналогами месторождений колчеданного семейства в вулканогенных и вулканогенно-осадочных толщах большинство специалистов считает сульфидные образования в океанах.

Современные океанические сульфиды. Современные глубоководные сульфидные руды Fe, Cu, Zn, Pb формируются в зонах срединно-океанических хребтов с высокими и средними скоростями спрединга (Восточно-Тихоокеанское поднятие, хр. Хуан-де-Фука, Галапагосское поднятие и др.), а также хребтов медленного спрединга (Срединно-Атлантический, Индийский, Горда). Кроме того, они обнаружены в районах вулканических островных дуг и задуговых бассейнов, рифтов, в горячих точках и окраинно-океанических обстановках. На дно океанов и морей металлы выносятся в составе термальных источников с температурой до 400 °С, магматических флюидов «черных курильщиков» и концентрируются в металлоносных илах, рудоносных рассолах, придонных стратиформных залежах, сульфидных конусах и трубах, в кратерах вулканов, конкреционных образованиях, корках, вкрапленности и штокверках среди метасоматически измененных пород океанического дна и др. Большая их часть рас-



сеивается в морской воде. Каналы поступления металлоносных термальных вод располагаются вдоль крупных разломов и приоткрытых трещин и сопровождаются «черными дымами» («курильщиками»). Источники такого типа характеризуются выведением из трубообразных каналов над выходами гидротермальных источников турбулентных потоков, несущих взвесь тонких частиц пирита, пирротина, сфалерита, халькопирита и др. (2–10 мкм) и их агрегатов (20–30 мкм). Потоки частиц в виде факела поднимаются из «труб» на высоту до 300 м. Далее рудный факел вытягивается по направлению течения, сохраняя свой состав первые километры, максимум до 10–15 км, а затем частицы рассеиваются по латерали. Предполагается значительная роль разноса частиц от центра потока и возможность их широкого перемещения по латерали [17]. Отложения океанических колчеданных руд находятся на глубине 2,5–4 тыс. м и формируются вблизи выходов на поверхность дна действующих гидротерм. Причины отложения рудных минералов – охлаждение и изменение состава в результате смешения гидротермального раствора с окружающей морской водой. Основу руд составляют пирит, сфалерит, халькопирит, самородная сера, ангидрит, пирротин, марказит и другие более редкие минералы. В области проявления гидротерм у дна установлена повышенная биологическая активность, главную часть которой составляют бактерии, окисляющие серу, железо и марганец, которые поступают в составе гидротермальных растворов с pH от 3,3 до 3,8 [21]. Сульфидные руды имеют четко выраженную Fe-Cu-Zn минерализацию, повторяющуюся во всех океанах. Данные по изотопному составу серы пирита, сфалерита и халькопирита Восточно-Тихоокеанского поднятия (δS^{34}) в минералах изменяются от +1,4 до +3,5 %, что однозначно указывает на глубинный источник сульфидной серы гидротерм. Самые крупные концентрации сульфидных руд выявлены в подводном хребте Хуан-де-Фука, представляющем центр спрединга Восточно-Тихоокеанского поднятия, Галапагосского рифта и впадины Атлантик II Красноморского рифта.

По результатам изучения пяти проб сульфидных руд из района хребта Хуан-де-Фука получены следующие содержания элементов (%): Fe 1,8–50,5, Zn 0,05–59,2, Cu 0,0003–0,32, Pb 0,05–0,25; Ag от менее 3 до 380 г/т. С помощью электронного микрозонда в вюртците и сфалерите установлен Cd до 0,42 %, в галените As до 9,72 % [19]. По предварительным расчетам, в пределах 7-километрового отрезка центрального грабена сконцентрировано около 500 тыс. т цинково-сульфидных руд, обогащенных серебром.

Крупным скоплением полиметаллических сульфидных руд, формировавшихся в течение последних 100 лет, являются месторождения Галапагосского рифта, расположенного в одноименной спрединговой структуре. На одном из скоплений подсчитано несколько миллионов тонн руды. Сред-

ний состав исследованных проб (%): S 40, Fe 38, Cu 6,5, Zn 1, SiO₂ 7, Mn 0,5, Al 0,3 и др. Имеется также золото 0,2, серебро 21 и палладий 0,05 ч./млн. Из проведенных исследований следует заключение о чрезвычайно коротком периоде формирования крупных залежей – всего несколько десятков лет, тогда как раньше считалось, что этот процесс длится несколько тысяч лет [20].

На Восточно-Тихоокеанском поднятии кроме основных структур в виде цепочки холмов вдоль гребня хребта выявлены склоновые структуры, которые представляют собой одиночные подводные вулканические горы. Одна из них находится в 7 км от оси поднятия, имеет диаметр основания 6 км и высоту до 400 м. С этим подводным сооружением связана зона гидротермальных образований длиной 800 м и шириной 200 м. Ее объем в 10 раз превышает аналогичные отложения основного грабена. Гидротермальные осадки представлены скоплениями гетита (~62 % площади зоны), массивными колчеданными образованиями (24 %), обогащенными кремнеземом, сульфидными отложениями (13 %) и медно-колчеданными залежами (1 %) [18].

Примером образования массивных сульфидных руд в кальдерах являются кальдеры вулканов Ред и Грин, основания которых расположены на отметках 2900–2600 м в восточной части Восточно-Тихоокеанского поднятия. Кальдеры имеют в поперечнике примерно 2 км. В кальдере вулкана Грин массивными колчеданными рудами слагаются небольшие (до 2 м) конусы-основания «черных курильщиков» и внутренние склоны кальдеры. Более крупные (до 10 м высотой и до 15 м в поперечнике) конусы сложены оксидными Fe- и Mn-рудами. Опал-барит-атакамитовые образования развиты в пониженных частях кальдеры. Состав сульфидных руд (%): пирит 2,2–78,3, марказит 0,1–39,2, халькопирит 0,1–11,3, ковеллин 0,2–5,1, сульфиды цинка 0,1–1,4, кварц 0–74,4, опал 0–76,4, иллит 0,1–7,7, оксиды Fe 0,2–7,03, опал-барит-атакамиты 76–87, барит 4–6, атакамит 4–9, Mn-оксиды до 0,4; элементы-примеси (%): в пирите – Co до 1,21, Ni до 0,03, As до 0,26, Cu до 0,24; в сульфидах цинка – Cd 0,57–1,19, Cu до 0,56, Mn до 0,13 [15].

Металлоносные отложения Красного моря во впадине Атлантик II на площади 60 км² содержат 30 млн т Fe, 2,2 млн т Zn, 0,5 млн т Cu, 6 тыс. т Ag. Дно впадины сложено базальтами, перекрытыми осадочной толщей мощностью до 30 м. Обогащение осадков Fe, Zn, Cu, Ag, Mn, Ba связано с формированием на дне Красного моря океанической коры, сопровождающейся гидротермальной деятельностью. Началось оно 5 млн лет назад и продолжается до сих пор. Гидротермы представляют собой высококонцентрированные рассолы с низким pH. Наиболее интенсивно гидротермальная деятельность проявилась в центральной части Красного моря вдоль осевого трога, по обе стороны которого залегают мощные толщи миоценовых эвапоритов. Сульфиды обычно



выпадают непосредственно у места излияния росола, а окислы – на некотором расстоянии от них [16].

В открытых современных сульфидных залежах на дне океанов основными первичными рудными минералами являются сульфиды железа (пирит, марказит, пирротин), меди (халькопирит, борнит, кубанит), цинка (сфалерит, вюртцит). Сульфиды свинца в большинстве случаев присутствуют в малых количествах. Главные элементы – Fe (с резким преобладанием), Cu и Zn, сопутствующие – Co (в пирите и пирротине), Mn, Au, Ag, Sn, Ni, As, Ba, TR и др. Закономерности распространения океанических руд определяются во взаимодействии океанской водной толщи с океанским фундаментом и нижележащей мантией, объединяющими эндогенные и экзогенные генетические факторы. Поставка рудного материала связывается с активизацией базитовых магм на уровне астеносферы в мантии. На завершающем этапе транспортировка и осаждение рудного материала контролируются вертикально неоднородной водной толщей, осуществляющей функции геохимического барьера, промежуточного накопителя и продуцента рудных образований на поверхности океанского дна [3, 11]. Источником рудного вещества для океанических руд считаются базальты океанического ложа, через которые путем конвективного рециклинга по зонам трещиноватости в рифтовых системах океаническая вода проникает на глубину до 5 км, нагревается, взаимодействует с вмещающими породами и выщелачивает из них металлы, превращаясь в рудоносный высокотемпературный раствор. На поверхности морского дна и в приповерхностных зонах базальтовых пород происходит отложение сульфидных руд. Другой источник металлов в гидротермальных системах, возможно даже главный, – предположительно металлоносный магматический флюид, выделяющийся непосредственно из высокотемпературного расплава в результате глубинной ликвации магмы [1, 2, 13 и др.]. Несмотря на широкое распространение гидротермальной полиметаллической минерализации в океанических структурах, промышленные скопления руд встречаются редко. Возникающие в рифтах сульфидные отложения испытывают интенсивное подводное выветривание и в значительных объемах рассеиваются. Сопоставлять конкретные геологические условия современного и древнего рудообразования очень сложно, поскольку они определяются многообразием сочетаний различных факторов. Идентичными могут быть процессы в тектонических обстановках со сходным магматизмом, источниками рудного вещества, но режим осадконакопления по простиранию даже единой структуры может коренным образом изменить характер рудообразования. Миграционные свойства главных рудообразующих элементов Fe, Cu, Zn, Pb и тем более Mn в экзогенных процессах различны. Если современные колчеданные образования залегают прямо на базальтах при отсутствии или небольшом количестве осадочных пород, то фа-

нерозойские колчеданные руды находятся в литолого-стратиграфических разрезах среди чередующихся вулканических и осадочных пород. Причем породы кислого состава могут резко преобладать. Одним из вариантов объяснения может быть то, что в современном океаническом процессе наблюдается только начальная стадия рудообразования. Сравнительное изучение океанских рудных скоплений показывает, что в процессе роста они эволюционируют по составу в направлении типичных древних колчеданных залежей. Поэтому судить о прямом соответствии между тектоническими условиями, магматизмом и рудоносностью районов океана и древними колчеданными и сульфидно-железоокисными месторождениями можно в самом общем виде. Сравнительная характеристика сульфидных образований в океанах и континентах приведена в таблице.

Древние колчеданные и сульфидно-железоокисные месторождения рассматриваются как производные ювенильного базальтоидного магматизма, который оказывается продуктивным лишь в таких обстановках, где исходные расплавы претерпевают те или иные превращения, приводящие к появлению умеренно кислых и кислых вулкаников. Последние рассматриваются либо как результат дифференциации базальтовых магм в провинциях, обладающих океанической корой, либо как следствие взаимодействия таких магм с корой сиалического состава, сопровождающегося выплавлением названных разновидностей вулкаников [10]. Большинство древних колчеданных и сульфидно-железоокисных месторождений в вулканогенно-осадочных толщах на континентах, сопоставляемых с современными колчеданными образованиями в океанах и морях, сформировано в задуговых (кипрские) и островодужных (уральские, алтайские, куроко) обстановках [8].

От 90 до 98 % эндогенного вещества рудоносного флюида не откладывается в виде рудных построек, а рассеивается в океане, образуя гидротермальный факел (плюмаж). Именно в нем происходит взаимодействие флюида с морской водой, находящееся в значительной мере под биологическим контролем. Состав взвесей меняется в пределах нескольких километров от источников. Сульфиды и продукты их окисления осаждаются в пределах небольшого расстояния от гидротермальных источников, на Восточно-Тихоокеанском поднятии – до 20 км. Огромная часть железа, находящаяся в водной среде в трехвалентной форме, при повышении pH образует коллоидные хлопьевидные суспензии. Осаждаясь, они образуют ореолы, простирающиеся на тысячи километров. Выпадение в осадок и сульфидных, и окисленных частиц осуществляется под действием геохимических барьеров, обусловленных восстановительной обстановкой и изменением кислотно-основного равновесия водной среды, резким понижением температуры и давления, биологического фактора



Сравнительная характеристика современных сульфидных образований в океанах и древних колчеданно-полиметаллических и сульфидно-магнетитовых месторождений

Характерные особенности	Сульфидные образования в океанах	Колчеданно-полиметаллические месторождения	Сульфидно-магнетитовые месторождения
Геотектоническая позиция	Срединно-океанические хребты, вулканические островные дуги, задуговые бассейны, окраинно-океанические обстановки	Вулканические островные дуги на океанической коре и на переработанном континентальном субстрате	Вулканические островные дуги, задуговые бассейны, активные континентальные окраины, рифтогенные прогибы
Подстилающие, рудовмещающие и околорудные вулканические комплексы	Базальты, офиолиты	Базальт-риолитовый калий-натрового профиля	Риолит-базальтовый, субщелочной базальт-риолитовый; калий-натрового и натрий-калиевого профиля
Морфология рудных тел, залежей и руд	Конусо- и трубообразная, металлоносные илы, линзо- и лентообразная, пластообразная, прожилковая, коркообразная, вкрапленная	Пласто- и линзообразная, реже жильная, полосчатая, слоистая, штокверковая	Пласто- и линзообразная, реже жильная, полосчатая, слоистая, штокверковая
Минеральный состав руд	Главные: сульфиды железа (пирит, пирротин, марказит), цинка (сфалерит, вюртцит), меди (халькопирит); сульфиды свинца в большинстве случаев редки	Главные: пирит, пирротин, вюртцит, халькопирит, галенит, барит; сопутствующие: золото, серебро, кадмий и др.	Главные: магнетит, пирит, пирротин, сфалерит, халькопирит; сопутствующие: золото, серебро, галенит, арсенопирит, висмутин, карбонаты марганца и др.
Химический состав руд	Главные: Fe, S, Zn, Cu; сопутствующие: Mn, Pb, Co, Ba, Au, Ag, Ni, Cr, Cd, As, Hg, V и др.	Главные: S, Fe, Zn, Cu, Pb, Ba; сопутствующие: Au, Ag, Co, Cd, Ni, As, W, Mo, Mn и др.	Главные: Fe, S, Zn, Cu; сопутствующие: Co, Mn, Au, Ag, Pb, B, P, V, As, Bi, Ni, Cr и др.
Ресурсы и запасы руды и отдельных главных элементов	Сумма главных и сопутствующих элементов от нескольких десятков тонн до 1000 тыс. т и более	Pb+Zn 50–2000 тыс. т, Cu 50–5000 тыс. т	S 640–10620 тыс. т, Fe от нескольких до сотен млн т, Cu 40–1150 тыс. т, Zn 20–1500 тыс. т, Co 7,5–80 тыс. т; Au 0–62,5 т, Ag 0–308 т

и т.д. Постепенное выпадение рудного вещества по трассе миграции плюмажей с придонными течениями сопровождается формированием стратифицированных зон минерализации. Рудонакопление из мигрирующих плюмажей (субмаринных «фонтанов»), по мнению А. И. Кривцова, может быть связано и с явлениями апвеллинга на склонах океанических и прибрежных поднятий. Накопления имеют стратифицированный характер с различной плотностью рудного вещества (гнезда-желваки, вкрапленность, массивные пластовые руды) [9].

Далее наступают этапы преобразования рудных залежей за счет диагенеза, динамотермального и контактового метаморфизма, гидротермального метасоматоза и других факторов. Весь процесс образования месторождений колчеданно-полиметаллических и сульфидно-магнетитовых руд состоит из двух этапов, которые можно представить в следующем виде: 1) растяжение земной коры – вулканизм – образование и диагенез металлоносных осадков; 2) сжатие – интрузивный магматизм – ме-

таморфизм, в том числе гидротермальный метасоматоз – преобразование рудных залежей.

Выводы

1. По тектоническому положению и обстановкам рудообразования, характеру магматизма, составу руд и их ресурсам наблюдается сходство между древними рудами колчеданно-полиметаллических и сульфидно-магнетитовых гидросиликатно-скарновых месторождений в вулканогенно-осадочных толщах и современными сульфидными образованиями океанов. И те, и другие образовались за счет глубинного магматического субмаринного источника рудного вещества в стадию растяжения земной коры.

2. Обращает на себя внимание поразительное сходство и выдержанность состава главных типоморфных минералов и химических элементов Fe, Zn, Cu по всей цепочке процесса рудообразования: гидротермальные металлоносные растворы, «черные курильщики», рудные конусы, холмы и поля в океанах, руды древних регионально- и контакто-



во-метаморфизованных сульфидных и сульфидно-железоокисных месторождений на континентах.

3. Сульфидно-магнетитовые руды гидросиликатно-скарновой формации складчатых областей следует рассматривать как звено в эволюционном ряду месторождений колчеданного семейства в сторону оксидных месторождений железа и марганца.

4. Приведенные материалы расширяют круг закономерностей пространственного нахождения и образования как железорудных, так и колчеданно-полиметаллических месторождений, подтверждают комплексный состав железных руд и необходимость их комплексного использования. Это обстоятельство следует учесть в методике поисков, разведки и эксплуатации сульфидно-магнетитовых месторождений.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Авдонин В. В.** Концепция колчеданного рудообразования: эволюция взглядов // Геология, методы поисков, разведки и оценки месторождений твердых полезных ископаемых: обзорная информация; вып. 5. – М.: Геоинформцентр, 2002. – 37 с.

2. **Бутузова Г. Ю.** К вопросу о генезисе гидротермально-осадочных образований Мирового океана (об источнике рудообразующих металлов) // Осадочная оболочка в пространстве и времени: докл. советских геологов на 28-й сессии МГК (Вашингтон, 1989). – М., 1989. – С. 120–131.

3. **Грамберг И. С., Андреев С. И.** Сравнительная минерагения современных океанов Земли // Геология, геохимия и геофизика на рубеже XX и XXI вв.: матер. всерос. науч. конф. Т. 2. Петрология, геохимия, минералогия, геология месторождений полезных ископаемых, геоэкология. – М.: Связь-Принт, 2002. – С. 251–252.

4. **Кассандров Э. Г.** Генезис как основа поисков магнетитовых месторождений в складчатых областях // Рудогенез. – Миасс; Екатеринбург: Институт минералогии УрО РАН, 2008. – С. 126–129.

5. **Кассандров Э. Г.** Комплексная оценка железных руд сырьевой базы черной металлургии Сибири и Дальнего Востока, проблемы их глубокой переработки и рационального освоения. – Новосибирск: СНИИГГиМС, 2015. – 118 с.

6. **Кассандров Э. Г.** Рудно-фациальная зональность гидросиликатно-скарново-магнетитовой формации юга Сибири // Зональность и условия локализации магматизма и рудных месторождений Сибири. – Новосибирск: СНИИГГиМС, 1988. – С. 47–56.

7. **Ковалев К. Р., Бусленко А. И.** Гидротермально-осадочный рудогенез и полиметаморфизм руд Озернинского рудного узла (Западное Забайкалье). – Новосибирск: Наука, 1992. – 213 с.

8. **Краснов С. Г.** Гидротермальная деятельность и сульфидное рудообразование в океане: автореф. дис. ... д. г.-м. н. – СПб.: ВНИИОкеангеология, 1993. – 39 с.

9. **Кривцов А. И.** Субмаринный рудогенез и металлоносность осадочных толщ // Вулканоген-

но-осадочное рудообразование. – СПб.: ВСЕГЕИ, 1992. – С. 21–24.

10. **Кривцов А. И., Макеева И. Т.** Источники рудного вещества эндогенных месторождений // Итоги науки и техники. Рудные месторождения. Т. 11. – М.: ВИНТИ, 1981. – 133 с.

11. **Минерально-сырьевой фонд Мирового океана (Металлогеническая карта Мирового океана) / С. И. Андреев, И. С. Грамберг, Л. И. Анисеева и др. // Отечественная геология. – 2000. – № 38 (спецвыпуск). – С. 6.**

12. **Нуварьева Ю. А., Сливинский А. А.** Некоторые признаки парагенеза стратиформных колчеданно-полиметаллических и железорудных месторождений Забайкалья // Процессы осадочного и вулканогенно-осадочного накопления цветных металлов (Сибирь и Дальний Восток). – Новосибирск: Наука, 1980. – С. 119–124.

13. **Прокопцев Н. Г.** О механизме поступления рудного вещества на дно океана из базальтового расплава // Докл. АН СССР. – 1985. – Т. 283, № 4. – С. 964–968.

14. **Щерба Г. Н., Дьячков Б. А., Нахтигаль Г. П.** Металлогения Рудного Алтая и Калбы. – Алма-Ата: Наука, 1984. – 239 с.

15. **Alt J. C., Lonsdale P., Haymon R.** Hydrothermal sulfide and oxide deposits on seamounts near 21° N, Fast Pacific Rise // Bull. Geol. Soc. Amer. – 1987. – Vol. 98, N 2. – P. 157–168.

16. **Basker, H.** Metalliferous sediments of hydrothermal origin from the Red Sea // Mar. Miner. Deposits – New Res. Results and Econ. Prospects. Proc. Clausthaler Workshop. – Essen, 1982. – P. 102–136.

17. **Converse, D. R., Holland H. D., Edmond J. M.** Flow rates in the axial hot springs of the East Pacific Rise (21° N): implications for the heat budget and the formation of massive sulfide deposits // Earth and Planet. Sci. Lett. – 1984. – Vol. 69, N 1. – P. 159–175.

18. **Hekinian R., Fouquet Y.** Volcanism and metallogenesis of axial and off-axial structures on the east pacific rise near 13° N // Econ. Geol. – 1985. – Vol. 80, N 2. – P. 221–255.

19. **Koski R. F., Clague D. F., Oudin E.** Mineralogy and chemistry of massive sulfide deposits from the Juan de Fuca Ridge // Bull. Geol. Soc. Amer. – 1984. – Vol. 95, N 8. – P. 930–945.

20. **Malahoff A.** A comparison of the massive submarine polymetallic sulfides of the Galapagos Rift with some continental deposits // Mar. Technol. Soc. J. – 1982. – Vol. 16, N 3. – P. 39–45.

21. **Von Damm K. L., Edmont J. M., Grant B.** Chemistry of submarine hydrothermal solutions at 21° N, East Pacific Rise // Geochim. et Cosmochim. Acta. – 1985. – Vol. 49, N 11. – P. 2197–2220.

REFERENCES

1. Avdonin V.V. *Kontseptsiya kolchedannogo rudobrazovaniya: evolyutsiya vzglyadov* [A concept of pyritic mineralization: Evolution of views]. *Geologiya, metody*



poiskov, razvedki i otsenki mestorozhdeniy tverdykh poleznykh iskopaemykh. *Obzornaya informatsiya. Vyp. 5*. [Geology, methods of prospecting, survey, and appraisal of solid mineral resources. Review. Issue 5]. Moscow, Geoinformtsentr Publ., 2002. 37 p. (In Russ.).

2. Butuzova G.Yu. [Genesis of hydrothermal-sedimentary formations of the World ocean (source of ore-forming metals)]. *Osadochnaya obolochka v prostranstve i vremeni. Dokl. sovetskikh geologov na 28 sessii Mezhdunarodnogo geologicheskogo kongressa. Vashington, 1989* [Sedimentary strata in space and time. Report of Soviet geologists at the 28th session of International Geological Congress. Washington, 1989]. Moscow, 1989, pp. 120–131. (In Russ.).

3. Gramberg I.S., Andreev S.I. [Comparative minerogeny of present-day oceans of the Earth]. *Materialy vserossiyskoy nauchnoy konferentsii «Geologiya, geokhimiya i geofizika na rubezhe XX i XXI vekov», T. 2. Petrologiya, geokhimiya, mineralogiya, geologiya mestorozhdeniy poleznykh iskopaemykh, geoekologiya* [Proc. of the All-Russian scientific conference *Geology, Geochemistry, and Geophysics at the turn of 20th and 21st centuries*, vol. 2. Petrology, geochemistry, mineralogy, geology of mineral deposits, geocology]. Moscow, Svyaz-Print Publ., 2002, pp. 251–252. (In Russ.).

4. Kassandrov E.G. [Genesis as the basis of search for magnetite deposits in folded areas]. *Rudogenez* [Ore genesis]. Miass-Ekaterinburg, Imin UrO RAS Publ., 2008, pp. 126–129. (In Russ.).

5. Kassandrov E.G. *Kompleksnaya otsenka zheleznykh rud syr'evoy bazy chernoy metallurgii Sibiri i Dal'nego Vostoka, problemy ikh glubokoy pererabotki i ratsional'nogo osvoeniya* [Comprehensive appraisal of iron ores in the mineral resource base of iron industry of Siberia and the Far East, problems of their advanced processing and rational development]. Novosibirsk, SNIIGGiMS Publ., 2015. 118 p. (In Russ.).

6. Kassandrov E.G. [Ore-facies zonation of hydro-silicate-skarn-magnetite formation of southern Siberia]. *Zonal'nost' i usloviya lokalizatsii magmatizma i rudnykh mestorozhdeniy Sibiri* [Zonation and localization of magmatism and ore deposits of Siberia]. Novosibirsk: SNIIGGiMS Publ., 1988, pp. 47–56. (In Russ.).

7. Kovalev K.R., Buslenko A.I. *Gidrotermal'no-osadochnyy rudogenez i polimetamorfizm rud Ozerninskogo rudnogo uzla (Zapadnoe Zabaykal'e)* [Hydrothermal-sedimentary ore genesis and polymetamorphism of ores in the Ozerninsky ore cluster]. Novosibirsk, Nauka Publ., 1992. 213 p. (In Russ.).

8. Krasnov S.G. *Gidrotermal'naya deyatel'nost' i sul'fidnoe rudoobrazovanie v okeane* [Hydrothermal activity and sulphide ore formation in the ocean]. Author's abstract of DSc thesis. Saint-Petersburg, VNI Okeangeologiya Publ., 1993. 39 p. (In Russ.).

9. Krivtsov A.I. [Submarine ore genesis and metal occurrences in sedimentary strata]. *Vulkanogenno-osadochnoe rudoobrazovanie* [Igneous-sedimentary

ore formation]. Saint-Petersburg, VSEGEI Publ., 1992, pp. 21–24. (In Russ.).

10. Krivtsov A.I., Makeeva I.T. [Sources of ore matter in endogenic deposits]. *Itogi nauki i tekhniki. Rudnye mestorozhdeniya. T.11* [Results in science and engineering. Ore deposits. Vol. 11]. Moscow, VINITI Publ., 1981. 133 p. (In Russ.).

11. Andreev S.I., Gramberg I.S., Anikeeva L.I., et al. [Mineral resources of the World ocean (metallogenic map of the World ocean)]. *Otechestvennaya geologiya – National Geology*, 2000, no. 38, sp. issue, p. 6. (In Russ.).

12. Nuvar'yeva Yu.A., Slivinskiy A.A. [Several features of paragenesis of stratiform pyrites-polymetallic deposits in Transbaikal]. *Protsesty osadochnogo i vulkanogenno-osadochnogo nakopleniya tsvetnykh metallov (Sibir' i Dal'niy Vostok)* [Sedimentary and igneous-sedimentary accumulation of non-ferrous metals (Siberia and the Far East)]. Novosibirsk, Nauka Publ., 1980, pp. 119–124. (In Russ.).

13. Prokoptsev N.G. *O mekhanizme postupleniya rudnogo veshchestva na dno okeana iz bazal'tovogo rasplav* [Entrance of ore matter in the ocean bottom from basaltic melts]. *Dokl. AN SSSR – Report of AS USSR*, 1985, vol. 283, no. 4, pp. 964–968. (In Russ.).

14. Shcherba G.N., Dyachkov B.A., Nakhtigal G.P. *Metallogeniya Rudnogo Altaya i Kalby* [Metallogeny of Rudny Altay and Kalba]. Alma-Ata, Nauka Publ., 1984. 239 p. (In Russ.).

15. Alt J. C., Lonsdale P., Haymon R. Hydrothermal sulfide and oxide deposits on seamounts near 21° N, Fast Pacific Rise. *Bull. Geol. Soc. Amer.*, 1987, vol. 98, no. 2, pp. 157–168.

16. Basker, H. Metalliferous sediments of hydrothermal origin from the Red Sea. *Mar. Miner. Deposits-New Res. Results and Econ. Prospects. Proc. Clausthaler Workshop*. Essen, 1982, pp. 102–136.

17. Converse, D. R., Holland H. D., Edmond J. M. Flow rates in the axial hot springs of the East Pacific Rise (21° N): implications for the heat budget and the formation of massive sulfide deposits. *Earth and Planet. Sci. Lett.*, 1984, vol. 69, no 1, pp. 159–175.

18. Hekinian R., Fouquet Y. Volcanism and metallogenesis of axial and off-axial structures on the east pacific rise near 13° N. *Econ. Geol.*, 1985, vol. 80, no 2, pp. 221–255.

19. Koski R. F., Clague D. F., Oudin E. Mineralogy and chemistry of massive sulfide deposits from the Juan de Fuca Ridge. *Bull. Geol. Soc. Amer.*, 1984, vol. 95, no 8, pp. 930–945.

20. Malahoff A. A comparison of the massive submarine polymetallic sulfides of the Galapagos Rift with some continental deposits. *Mar. Technol. Soc. J.*, 1982, vol. 16, no 3, pp. 39–45.

21. Von Damm K. L., Edmond J. M., Grant B. Chemistry of submarine hydrothermal solutions at 21° N, East Pacific Rise. *Geochim. et Cosmochim. Acta*, 1985, vol. 49, no 11, pp. 2197–2220.