

МОДЕЛЬ КОЛЧЕДАНОНОСНОЙ РУДНО-МАГМАТИЧЕСКОЙ СИСТЕМЫ АКЖАРСКОГО РУДНОГО ПОЛЯ (ЮЖНЫЙ УРАЛ)**MODEL OF MASSIVE SULPHIDE ORE-MAGMATIC SYSTEM OF AKZHARSKY ORE FIELD (SOUTH URALS)****М. В. Рыкус****Mikhail V. Rykus**

Уфимский государственный
нефтяной технический
университет,
г. Уфа, Российская Федерация

Ufa State Petroleum
Technological University,
Ufa, Russian Federation

В. И. Сначёв**Vladimir I. Snachev**

Институт геологии
Уфимского федерального
исследовательского центра РАН,
г. Уфа, Российская Федерация

Institute of Geology, Ufa Federal
Research Centre of the Russian
Academy of Sciences,
Ufa, Russian Federation

На примере Акжарского рудного поля разработана модель эволюции колчеданосной рудно-магматической системы, в основу которой положен анализ двух групп элементов типовой модели, характеризующих магматический и рудный этапы ее развития. Согласно предлагаемой модели, рудные залежи Акжарского рудного поля формировались комбинированным способом. Медь поступала с глубинными гидротермальными растворами, отделяющимися в процессе магматической ликвации на завершающем (рудном) этапе развития рудно-магматической системы. Сера также имела ювенильный источник, о чем свидетельствует близость её изотопного состава в пиритах к метеоритному стандарту, а железо извлекалось из вмещающих пород в результате их гидротермальной переработки. С началом рудного процесса связано образование околорудных пропилитов и отложение гидротермально-осадочным способом гидроокисной железистой минерализации, впоследствии под влиянием метаморфизма преобразованной в магнетитовые руды. Колчеданное оруденение завершает рудогенез и является продуктом частичной переработки ранних гидроксидных железистых руд более поздними колчеданосными гидротермами. Рудообразование было кратковременным и протекало в условиях периодически возобновляемой вулканической деятельности, что способствовало быстрому захоронению руд и препятствовало полному развитию рудного цикла от наиболее ранних к завершающим минеральным парагенезисам, а также созданию крупных колчеданных залежей. Процесс колчеданного рудообразования был кратковременным и одностадийным, что проявилось в относительной простоте и однообразии текстурно-структурных особенностей руд, телескопировании продуктивной минерализации в узком вертикальном интервале, отсутствии в ряде случаев отчетливой минеральной и геохимической зональности.

A model of the evolution of a massive sulphide ore-magmatic system was constructed for the Akzharsky ore field, which is based on the analysis of two groups of elements of a typical model that characterize the magmatic and ore stages of its development. According to the proposed model, the ore deposits of the Akzharsky ore field were formed by a combined method. Copper came with deep hydrothermal solutions, separated in the process of magmatic liquation at the final (ore) stage of the development of the ore-magmatic system. Sulfur also had a juvenile source, as evidenced by the closeness of its isotopic composition in pyrites to the meteorite standard, and iron was extracted from the host rocks as a result of their hydrothermal processing.

Ключевые слова

рудно-магматическая система;
модель; колчеданные руды;
термобарогеохимия;
изотопия серы;
Акжарское рудное поле;
температура

Key words

ore-magmatic system; model;
massive sulphide ores;
thermo-barogeochemistry;
sulfur isotopy; Akzharsky ore field;
temperature

The onset of the ore process is associated with the formation of propylites and the hydrothermal-sedimentary deposition of hydroxide ferrous mineralization, subsequently transformed into magnetite ores under the influence of metamorphism. Massive sulphide mineralization completes ore formation and is a product of partial processing of early hydroxide ferruginous ores by later pyrite-bearing fluids. Ore formation was short-lived and proceeded under conditions of periodically renewed volcanic activity, which contributed to the rapid burial of ores and prevented the full development of the ore cycle from the earliest to the final mineral paragenesis, as well as the creation of large massive sulphide deposits. The process of massive sulphide ore formation was short-term and one-stage, which manifested itself in the relative simplicity and uniformity of the texture and structural features of the ores, telescoping of productive mineralization in a narrow vertical interval, and the absence in some cases of distinct mineral and geochemical zoning.

Общие сведения

Современная концепция формирования колчеданных месторождений базируется на представлениях об их тесной пространственной и временной связи с продуктами субмаринного вулканизма [1, 2]. Это обстоятельство позволяет нам вслед за другими исследователями [3] рассматривать совокупность рудных и магматических формаций в качестве рудно-магматических систем (РМС).

Связь оруденения с магматическими комплексами, возникающая в ходе магматогенно-рудного процесса, предопределяет выделение двух групп элементов типовой РМС. Главные элементы первой группы — структурно-тектонические и фашиально-формационные характеризуют магматический этап развития системы. В развитии структуры рудных полей выделяются три этапа: 1) начальный этап заложения магмоконтролирующих разломов; 2) этап активного формирования вулканогенных комплексов и связанных с ними вулканических структур; 3) этап деструкции вулканических построек (тектонического преобразования структур рудных полей). Колчеданная минерализация пространственно и во времени ассоциирует со вторым этапом.

Во вторую группу элементов, охватывающую собственно рудный этап развития колчеданной РМС, входят колчеданные руды и сопровождающие их околорудные метасоматиты. Здесь наиболее важными для создания генетической модели являются: текстурно-структурный анализ руд, выделение и анализ парагенетических минеральных ассоциаций, а также установление возрастных взаимоотношений минеральных агрегатов и на их основе решение проблемы непрерывности-прерывистости (дискретности) колчеданного рудообразования, выяснение термобарогеохимических

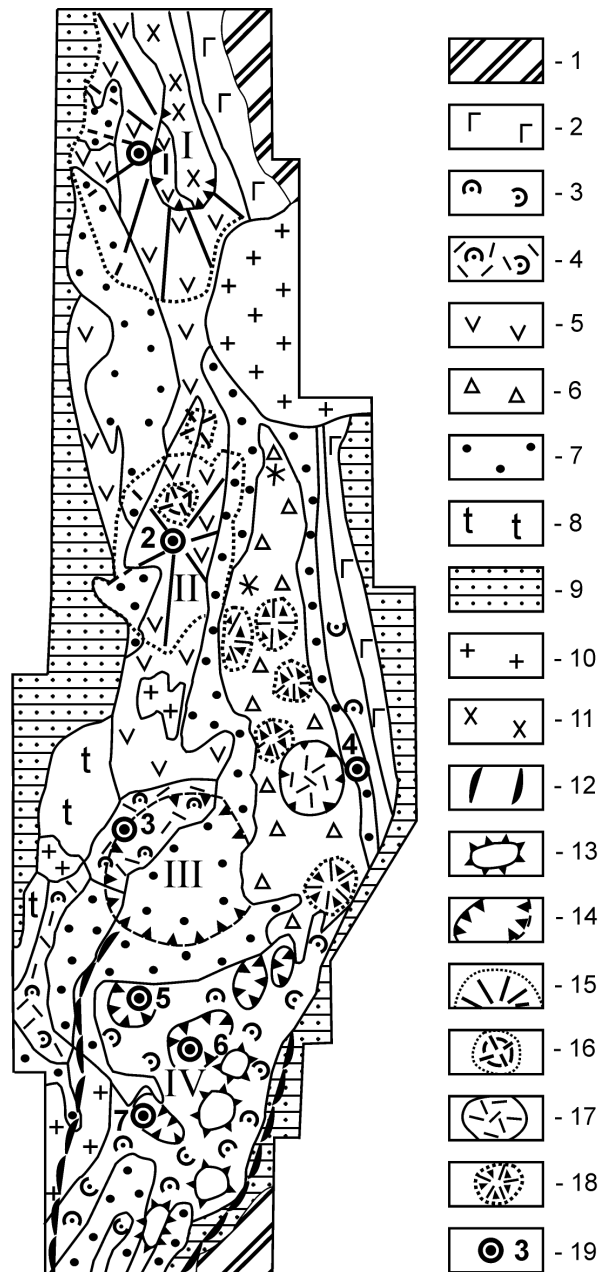
условий рудоотложения и источников главных рудообразующих компонентов — железа, меди, серы.

Отдельные элементы или аспекты собственно рудного этапа развития колчеданной РМС для Акжарского рудного поля рассмотрены в наших работах [4, 5], а на некоторых других аспектах остановимся подробнее ниже.

Краткая характеристика геологического строения Акжарского рудного поля

Данная статья является продолжением ранее опубликованного материала по Акжарскому рудному полю [5], поэтому во избежание повтора ниже приводится только его краткая характеристика. Рассматриваемое рудное поле, занимающее западную часть Джусинско-Домбаровского палеовулканического пояса, сложено вулканогенными породами эйфельского возраста, которые с севера граничат с вулканитами джусинского комплекса, а с юга и востока перекрыты вулканогенно-осадочными отложениями верхнекукбуктинской толщи (рисунок 1) [6]. Западная половина рудного поля по тектоническому нарушению граничит с более молодыми ($C_1 t_1 v_1$) отложениями вулканогенно-терригенной толщи Акжарского грабена [4]. В строении рудовмещающего вулканогенного комплекса участвуют три толщи: нижняя базальтовая, риолит-базальтовая и верхняя базальтовая.

Формирование Джусинско-Домбаровского палеовулканического пояса происходило в локальной рифтоподобной структуре, магматизм которой эволюционировал от континентального рифтогенного петрохимического типа до островодужного [4, 7]. Он довольно сильно отличается от рифтогенно-континентальных образований рифейского [8], ордовикского [9] и каменноугольного [10] возрастов.



Условные обозначения: 1 — верхнепротерозойско-нижнекембрийские биотитовые гнейсы и плагиогнейсы Восточно-Уральского поднятия; 2–9 — вулканогенные формации: 2 — кремнисто-терригенно-трахибазальтовая (Pz₁), 3 — базальтовая (D₂ef), 4 — риолит-базальтовая (D₂ef), 5 — базальт-андезит-дацит-риолитовая (D₂ef), 6–7 — андезито-базальтовая: 6 — кутебайская толща, 7 — верхнекукбуктинская толща (D₂ef), 8 — трахибазальтовая (D₃ — C₁t₁v₁), 9 — прибрежно-морской угленосной молассы (C₁t₁v₁).
Интрузивные формации: 10а — мигматит-гнейсо-гранитовая (D₃-C₁t₁), 10б — габбро-диорит-сиенит-гранитовая (Pz₃), 11 — габбро-диорит-плагиогранитовая (D₃fr);
 12–18 — вулканические структуры: 12 — Джаилганский базальтовый щитовой вулкан, 13 — базальтовые вулканические поднятия (малые щитовые вулканы), 14 — границы кальдерных депрессий: а — установленные, б — предполагаемые, 15 — стратовулканы базальт-андезит-дацит-риолитового состава, 16 — эффузивно-пирокластические постройки существенно кислого состава, 17 — постройки центрального типа с вершинной кальдерой, выполненной кислыми породами андезито-базальтовой формации, 18 — стратовулканы базальт-андезитобазальтового состава; 19 — месторождения: 1 — Джусинское, 2 — Барсучий Лог, 3 — Акжарское, 4 — Зимнее, 5 — Летнее, 6 — Осеннее, 7 — Левобережное.
 I–IV — номера крупных вулканических структур: I — Джусинский стратовулкан, II — стратовулкан Барсучий Лог, III — Акжарская кальдера, IV — Джаилганский щитовой вулкан

Рисунок 1. Схематическая палеовулканологическая карта района. Составлена авторами с использованием материалов П.В. Лядского [6]

Температуры колчеданного рудообразования и некоторые данные о составе рудообразующих флюидов

Для суждения о температурном режиме колчеданного рудообразования Акжарского рудного поля использовались материалы, включающие комплекс косвенных данных и результаты прямых экспериментальных исследований.

К косвенным данным отнесены: 1) минеральные парагенезисы руд, последовательность выделения минералов и находки отдельных минералов, которые можно использовать как геологические термометры; 2) структуры распада твердых растворов в сульфидах.

Из экспериментальных исследований выполнены: 1) определение температур декрепитации газовой-жидких включений (ГЖВ) в кварце из рудных минеральных ассоциаций; 2) терромагнитные исследования магнетитов из существенно магнетитовых и магнетит-пиритовых руд [4].

Главными минералами в рудах Акжарского рудного поля являются пирит, халькопирит, сфалерит и в некоторых случаях магнетит, а среди нерудных минералов хлорит, кварц и в подчиненном количестве по сравнению с ними серицит. Перечисленный минеральный состав руд и слагающие их немногочисленные минеральные ассоциации, согласно П.М. Татаринкову [11], представляют собою типичный парагенезис среднетемпературных месторождений, а по П. Линдгрэну [12] они соответствуют мезотермальным месторождениям, что отвечает температурам формирования руд ниже 300 °С.

Гидротермальные изменения рудовмещающих пород (хлоритизация, серицитизация,

частично окварцевание) соответствуют также средне-температурному минеральному парагенезису. Подтверждением этому являются встречающиеся в рудах и околорудном ореоле карбонаты (кальцит) и барит.

В исследованных рудах иногда присутствуют эмульсиевидные и эмульсионные структуры распада твердых растворов халькопирита в сфалерите. Согласно экспериментальным данным N.W. Buerger [13], структуры распада халькопирит-сфалерит соответствуют температурам 350–400 °С.

Из методов термобарогеохимии для определения температурного режима колчеданного минералообразования использован только метод декрепитации газовой-жидких включений (ГЖВ) в кварце, парагенном с главными рудообразующими сульфидами (пиритом, халькопиритом) и магнетитом. Полученные температуры декрепитации (T_d) включений в кварце различных минеральных ассоциаций приведены в таблице 1.

В кварце установлены включения одно-, двух- и трехфазовые, от жидких до существенно газовых, преобладают газовой-жидкие. Газовая фаза занимает от 10 % до 90 % от объема вакуолей. Имеются включения темного цвета, где фазовую границу различить невозможно, вероятно, это газовые включения. В трехфазовых включениях присутствует углекислота. Форма включений разнообразна: изометричная, эллипсоидная, прямоугольная, червеобразная, чечевицеобразная и удлиненная. Включения удлиненной формы — результат динамометаморфизма, они чаще однофазовые и имеют линейную ориентировку. Иногда такие включения ориентированы по взаимопересекаемым направлениям.

Таблица 1. Температура декрепитации включений в минералах рудных минеральных ассоциаций Акжарского рудного поля

№ п/п	Минеральная ассоциация	Анализируемый минерал	T_d , °С
1	Кварц-магнетитовая	кварц	390, 520
2		кварц	40, 510, 620, 750
3		кварц	60
4	Пиритовая	кварц	180, 330, 450, 540
5		кварц	210, 300, 430, 530
6		кварц	240, 340, 450, 500
7		кварц	360, 440, 520, 610
8	Халькопиритовая	кварц	180, 320, 440, 510, 650
9		кварц	40, 200, 330, 440, 540, 660, 730
10		кварц	50, 320, 410, 530, 750
11		кварц	50, 260, 380, 500, 710
12		кварц	50, 390, 510, 710

В кварце из кварц-магнетитовой ассоциации с явными геолого-минералогическими признаками осадочного происхождения обнаруживаются мелкие однофазовые и двухфазовые (объем газовой фазы около 10 %) включения, с температурой декрепитации 40–60 °С, 390 °С, а также высокотемпературные включения ($T_d = 500$ °С). На декрептограммах характерно отсутствие эффектов при температурах от 100 °С до 350 °С, свойственных минералам колчеданных ассоциаций.

В кварце сульфидных минеральных ассоциаций характерно присутствие наряду с однофазовыми включениями двухфазовых включений с объемом газовой фазы от 10 % до 70 %, а также трехфазовых, содержащих углекислоту. Декрепитируют эти включения в пределах 300–330 °С, иногда 340 °С, 360 °С.

На декрептометрических кривых обнаруживаются также четкие эффекты при температурах 180–210 °С, реже 240 °С. Сюда же следует отнести и данные температур декрепитации ГЖВ из прожилковидных обособлений в ассоциации с галенитом и гипсом среди колчеданных руд. По аналогии с другими месторождениями колчеданного типа Урала [14] правомочно предположение, что $T_d = 180$ –210 °С и 240 °С ГЖВ в кварце могут отражать температурные условия окolorудного метасоматоза, сопровождающего колчеданное оруденение.

На декрептограммах кварца из колчеданных минеральных ассоциаций зафиксированы эффекты при 410–450 °С. Уверенная интерпретация природы ГЖВ, показавших приведенные T_d в силу ограниченного числа изученных проб, затруднительна. Не исключено, что они отражают температурный режим регионального метаморфизма в условиях эпидот-актинолитовой субфации.

В кварце обеих минеральных ассоциаций обнаруживаются включения причудливой формы, создающие впечатление раздавленных или угловатые, как бы разорванные, а также чечевице- и червеобразные или просто удлиненные. Включения этих форм часто линейно ориентированы, иногда в противоположных направлениях. В различных образцах преобладают те или иные формы включений. Это преимущественно однофазовые, реже двухфазовые с небольшим газовым пузырьком включения. Сохранились и ненарушенные включения с газовой фазой до 90 % от объема. Эти включения дают эффекты от разрыва при температурах 500–540 °С, 610–680 °С и

730–750 °С. Первой группе температур присуща и большая интенсивность спада вакуума.

Вышеописанная форма ГЖВ минералообразующих сред (несущих следы давления) и особенности расположения ГЖВ в зернах нерудных минералов дают дополнительные данные о том, что породы рудоносного комплекса испытали интенсивный динамометаморфизм. Не исключено, что последний проявлялся неоднократно, о чем свидетельствуют несколько интервалов высоких температур, при которых вскрываются ГЖВ, а также пересечения линейных ориентировок деформированных групп включений. Поэтому вполне вероятно, что упомянутые выше группы температур (500–540 °С, 610–680 °С и 730–750 °С) являются температурами декрепитации включений, образовавшихся в результате динамометаморфизма.

Таким образом, данные декрептометрических исследований показывают, что температурный режим колчеданного рудообразования на Акжарском рудном поле был близок к 300 °С с некоторым снижением температур минералообразования в сопутствующих рудным минералам окolorудных метасоматитах. Эти данные соответствуют температурному режиму формирования главнейших продуктивных минеральных парагенезисов на колчеданных месторождениях Урала [14].

Совместный анализ материалов о температурном режиме формирования железистоокисной минерализации по данным декрепитации и термомагнитных исследований [4] показывает неоднородность полученных результатов. Эти данные свидетельствуют о весьма широком вероятном диапазоне температурного режима формирования и преобразования железистоокисной минерализации: от 100 °С до 390 °С. В то же время есть основание полагать, что магнетит, связанный с колчеданным рудообразованием (магнетит-2), формировался при температурах, сопоставимых с температурами сульфидного минералообразования.

Изотопный состав серы сульфидов

Результаты определения δS^{34} , характеризующие Южное и Южно-Акжарское рудопроявления, представлены в таблице 2, из которой следует, что максимальный диапазон разброса δS^{34} колеблется от +3,6 ‰ до –6,6 ‰, составляя в сумме 10,2 ‰, что полностью укладывается в рамки значений, характерных для колчеданных месторождений Урала. В целом для рудного поля характерна незначительная дис-

персия значений δS^{34} , что, вероятнее всего, свидетельствует о гомогенности источника сульфидообразующей серы. Если же из общего количества 18 определений исключить 4, характеризующиеся максимальными значениями δS^{34} , то для оставшихся 14 проб, а это 78 % от всех определений, диапазон вариаций

сокращается всего до 5,5 ‰, соответственно от +1,9 ‰ до -3,6 ‰. На гистограмме распределения величин δS^{34} выделяется два пика, соответствующие значениям, близким к метеоритному стандарту, что указывает на ювенильный источник сульфидной серы в рудах Акжарского рудного поля.

Таблица 2. Результаты определения изотопного состава серы в сульфидных минералах колчеданных руд Акжарского рудного поля

№ п/п	Характеристика минерала	$\delta S^{34}\text{‰}$
1	Пирит из сплошной халькопирит-пиритовой руды	+1,9
2	Пирит из сплошной халькопирит-пиритовой руды	-1,8
3	Пирит из сплошной халькопирит-пиритовой руды	-2,0
4	Пирит из сплошной халькопирит-пиритовой руды	-1,6
5	Пирит из прожилково-вкрапленной халькопирит-пиритовой руды	+3,6
6	Пирит из прожилково-вкрапленной халькопирит-пиритовой руды	+1,2
7	Пирит из прожилково-вкрапленной халькопирит-пиритовой руды	0,0
8	Пирит из прожилково-вкрапленной халькопирит-пиритовой руды	-3,0
9	Пирит из густовкрапленной халькопирит-пиритовой руды	-5,4
10	Халькопирит из халькопирит-кальцитового прожилка в кварц-хлоритовом метасоматите	-2,2
11	Пирит из сплошной халькопирит-пиритовой руды	-0,3
12	Пирит из сплошной халькопирит-пиритовой руды	-2,5
13	Пирит из сплошной халькопирит-пиритовой руды	-5,0
14	Пирит из сплошной халькопирит-пиритовой руды	-6,6
15	Пирит из сплошной халькопирит-пиритовой руды	-3,6
16	Пирит из сплошной халькопирит-пиритовой руды	-1,7
17	Пирит из вкраплено-прожилковой пиритовой минерализации в хлоритолите	0,0
18	Пирит из вкраплено-прожилковой пиритовой минерализации в хлорит-кварцевом метасоматите	-0,8

При всем сходстве обсуждаемых результатов с аналогичными данными для других колчеданных месторождений Урала на Акжарском рудном поле намечается тенденция к проявлению «своего облика» по изотопному составу серы сульфидов. Так, в отличие от подавляющего большинства из 18 изученных месторождений Урала, для Акжарского рудного поля намечается отчетливый сдвиг большей части определений (15 из 18) в минусовую область гистограммы. Особенно наглядно это проявляется при сравнении с такими месторождениями, как Учалы, Озерное, Сибай, Юбилейное, им. XIX Партсъезда. Не исключено, что эта тенденция наряду с бимодальным распределением изотопного состава пиритной серы может оказаться характерной особенностью месторождений домбаровского типа.

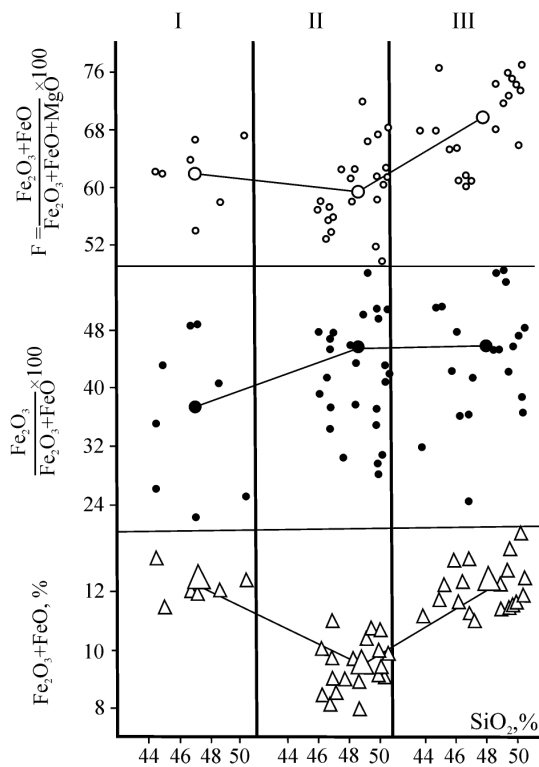
О возможном источнике рудообразующих металлов

Многими исследователями [2, 13] было показано, что изменчивость геохимических особенностей и минерального состава руд колчеданных месторождений определяется геологическими условиями их локализации: типом

рудовмещающей формации, строением земной коры, на которой развивался вулканизм, и составом пород, подстилающих рудные залежи. Согласно традиционным представлениям, источниками рудообразующих металлов колчеданных месторождений могут быть либо магматические очаги, либо подстилающие рудные тела породы.

Для решения вопроса о возможных источниках металлов в колчеданных рудах авторами проведено изучение состава базальтов рудовмещающих комплексов Аджарского рудного поля с учетом вариаций содержаний в них железа и меди. При этом, чтобы избежать искажений первичного состава вулканитов, в выборки включались только те анализы, у которых не нарушен баланс между главными породообразующими элементами. Большое значение для понимания механизма рудоотложения и выяснения источников рудного вещества имеет анализ распределения содержаний железа и меди в базальтах последовательно образовавшихся толщ рудоносных комплексов с учетом их вторичных преобразований, связанных с рудным процессом.

На Акжарском рудном поле анализировались средние содержания железа в базальтах подрудной, рудоносной и надрудной толщ. Как следует из рисунка 2, общее повышение железистости в базальтах происходит от подрудной к надрудной толще риодацит-базальтового комплекса, что хорошо согласуется с установленной тенденцией возрастания железистости в ходе магматического процесса от его начальной к конечной стадиям. Среднее значение суммарного железа в базальтах подрудной и надрудной толщ остается при этом примерно на одном уровне. Обращает внимание, что на этом фоне в рудоносных (предрудных) базальтах происходит резкое снижение значений суммарного железа и железистости. Дефицит железа составляет в среднем 2,8%. Степень окисленности железа в базальтах постепенно возрастает снизу вверх по разрезу.



I — подрудные; II — рудные; III — надрудные

Рисунок 2. Вариации содержаний суммарного железа, степени окисленности железа и железистости (F) в разновозрастных базальтах Акжарского рудного поля

Необычно низкая для толеитовых базальтов концентрация железа в вулканитах рудоносных комплексов указывает на частичный вынос этого элемента из подстилающих рудные залежи пород. Экстракция железа происходила из предрудных базальтов, подверг-

шихся пропилитизации, которая сопровождалась интенсивным преобразованием исходного химического состава вулканитов.

Особенности распределения содержаний меди в базальтах рудоносных комплексов изучались по данным спектральных и атомно-абсорбционных анализов, которые имеют хорошую сопоставимость в количественных показателях. Для Акжарского рудного поля [4] установлены максимальные средние и модальные (фоновые) содержания меди в рудовмещающих базальтах и резко пониженные (в 2 раза и более) значения этих показателей в подрудных и пострудных вулканитах, что также свидетельствует о медной геохимической специализации базальтовых расплавов, изливавшихся в период, непосредственно предшествующий рудоотложению.

Следует отметить, что выявленная закономерность в распределении рудогенных элементов по данным И.Б. Серавкина [15] не проявляется в безрудных участках, где гидротермальная деятельность отсутствовала, а постмагматические преобразования базальтов носили в основном изохимический характер и распределение элементов в разновозрастных вулканитах было обусловлено процессами магматической дифференциации.

Установленная закономерность обеднения железом предрудных базальтов свидетельствует о том, что мобилизация железа происходила именно из пород, предшествующих рудоотложению, а подстилающие их вулканиты не подверглись выщелачиванию. Такой вариант возможен при автотасоматозе комплекса пород с высокой газонасыщенностью исходных расплавов

Модель колчеданосной РМС

Приведенные данные по изменчивости содержаний железа и меди в базальтах рудоносных комплексов, известные для многих рудных полей Южного Урала, послужили основой создания ряда генетических моделей месторождений уральского типа [15, 16].

Полученные авторами данные о распределении содержаний железа и меди в базальтах Акжарского рудного поля, о характере околорудных изменений, об особенностях минерального состава и строения руд, температурах колчеданного рудообразования позволили обосновать обобщенную модель развития колчеданосной РМС. Основные черты её эволюции сводятся к следующему.

В магматический этап развития РМС происходили трещинные излияния толеитовых базальтов, сформировавших щитовой вулкан. Позднее в результате опустошения периферических очагов вершинная часть щитового вулкана была осложнена кальдерообразной депрессией. В последующую стадию происходило излияние кислых эффузивов и эвтакситовых базальтов, образовавших рудоносные риодацит-базальтовые постройки. Появление кислых пород свидетельствовало об эволюции магматического очага, в котором расплавы подверглись магматической дифференциации, осуществляемой по механизму ликвации.

Ликвационное расщепление силикатного расплава способствовало снижению его вязкости и интенсивному отделению большого объёма гидротермальных растворов, которые в магматически-гидротермальный этап развития РМС производили автотектоническую пропилитизацию предрудных базальтов. Ведущая роль в преобразовании вулканических синвулканических гидротермальных растворов подтверждается пространственной приуроченностью продуктов пропилитизации только к предрудным эвтакситовым базальтам и ликвационным кислым вулканитам, т.е. к породам с признаками повышенного содержания летучих в исходных расплавах, тогда как подстилающие их массивные базальты не подвергались воздействию гидротерм. Существенный вклад в баланс рудного вещества металлоносных поствулканических гидротерм отмечается не только для колчеданных месторождений, но и для других минерализованных объектов, ассоциированных с продуктами вулканизма океанического и островодужного типов [17].

В ходе пропилитизации эвтакситовых базальтов, протекавшей в обстановке затухающей вулканической деятельности, происходило выщелачивание железа, что привело к нарушению его баланса в материнских породах и резкому снижению в них магнитной восприимчивости. Заимствованное из вулканических железистых гидротермальными растворами в придонную часть морского бассейна, где в условиях окислительной среды происходило его осаждение в форме гидроксидных соединений, перемежавшееся с отложением кремней и образованием хлоритов.

В рудный этап развития РМС в результате воздействия рудоносных гидротерм на ги-

дроксиды железа последние подверглись частичному замещению с образованием пирита, составляющего основу медно-колчеданных руд. Продуктивный этап рудообразования протекал в условиях периодически возобновляемой вулканической деятельности и начавшегося захоронения рудных тел.

Параллельно-последовательное проявление процессов рудообразования и вулканизма с последующим быстрым захоронением рудных тел базальтовыми потоками явилось, очевидно, основной причиной отсутствия в пределах рудного поля крупных колчеданных залежей. По этой же причине процесс колчеданного рудообразования был кратковременным и одностадийным, что проявилось в относительной простоте и однообразии текстурно-структурных особенностей руд, телекопировании продуктивной минерализации в узком вертикальном интервале, отсутствии в ряде случаев отчетливой минеральной и геохимической зональности. Колчеданные проявления Акжарского рудного поля можно рассматривать в связи с этим как продукты незавершенного рудообразования, протекавшего в условиях незрелой рудно-магматической системы с начальным проявлением процессов магматической дифференциации, о чём свидетельствуют малые объёмы кислых вулканических пород.

В пострудный этап произошли существенные диагенетические и метаморфические изменения первичных руд. В процессе диагенетических преобразований гидроксидов железа (незамещенных в рудный этап развития РМС) могло начаться образование гематита, а позднее под влиянием метаморфических процессов по нему сформировалась основная масса магнетитовых руд.

Вывод

Таким образом, согласно приведенной модели формирования колчеданных залежей источник рудного вещества был комбинированным: медь поступала с глубинными гидротермальными растворами, отделяющимися в процессе магматической ликвации на завершающем (рудном) этапе развития РМС; сера также имела ювенильный источник, о чем свидетельствует близость её изотопного состава в пиритах к метеоритному стандарту, а железо извлекалось из вмещающих пород в результате их гидротермальной переработки.

Работа выполнена в рамках Государственного задания по теме № 0246-2019-0078.

СПИСОК ИСПОЛЬЗУЕМЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. Скрипченко Н.С. Вулканогенно-осадочное рудообразование (на примере колчеданных месторождений Северного Кавказа). М.: Недра, 1966. 291 с.
2. Смирнов В.И. Генезис эндогенных рудных месторождений. М.: Недра, 1968. 719 р.
3. Власов Г.М., Компаниченко В.Н., Мальшев Ю.Ф. Магматогенно-рудные системы. М.: Наука, 1986. 252 с.
4. Рыкус М.В. Вулканизм и металлогения Джусинско-Домбаровского палеовулканического пояса Южного Урала. Уфа: БНЦ УрО РАН, 1992. 171 с.
5. Рыкус М.В., Сначёв В.И. Палеовулканические условия образования колчеданного оруденения Акжарского рудного поля (Южный Урал) // Нефтегазовое дело. 2018. Т. 16. № 4. С. 40–50. DOI: 10.17122/ngdelo-2018-4-40-50.
6. Лядский П.В. Раннегеосинклинальные вулканогенные формации и колчеданное оруденение Домбаровского района: дис. ... канд. геол.-минерал. наук. Свердловск, 1986. 227 с.
7. Князев Ю.Г., Князева О.Ю., Сначёв В.И., Жданов А.В., Каримов Т.Р., Айдаров Э.М., Масагутов Р.Х., Арсланова Э.Р. Государственная геологическая карта Российской Федерации. Масштаб 1:1000000 (3-е поколение). Серия Уральская. Лист N-40 (Уфа). Объяснительная записка. СПб.: ФГБУ «ВСЕГЕИ», 2013. 512 с.
8. Сначёв В.И., Пучков В.Н., Савельев Д.Е., Мосейчук В.М., Сначёв А.В., Шиянова А.А., Рыкус М.В. Рудоносность углеродистых отложений северной половины Маярдакского и Ямантауского антиклинориев // Геологический сборник. 2007. № 6. С. 227–232.
9. Савельев Д.Е., Сначёв А.В., Пучков В.Н., Сначёв В.И. Петрогеохимические и геодинамические особенности формирования ордовикско-раннесилурийских базальтов восточного склона Южного Урала // Геологический сборник. 2006. № 5. С. 86–104.
10. Сначёв А.В., Пучков В.Н., Сначёв В.И., Савельев Д.Е., Бажин Е.А. Большаковский габбровый массив фрагмент Южно-Уральской зоны раннекаменноугольного рифта // Доклады Академии наук. 2009. Т. 429. № 1. С. 79–81.
11. Татаринев П.М. Условия образования месторождений рудных и нерудных полезных ископаемых. М.: Госгеолотехиздат, 1955. 280 с.
12. Линдгрэн В. Последовательность минералов и температура их образования в рудных месторождениях магматического типа. Л.: ЦБГ, 1938. 40 с.
13. Buerger N.W. The Unmixing of Chalcopyrite from Sphalerite // American Mineralogist. 1934. Vol. 19. P. 526–530.
14. Пшеничный Г.Н., Хайретдинов И.А., Андриянова Н.А. Температуры и глубины рудообразования на месторождениях колчеданной формации Южного Урала // Основные параметры природных процессов эндогенного рудообразования: тезисы докл. к Всесоюз. совещ. Новосибирск: ИГиГ СО АН СССР, 1977. С. 19–26.
15. Серавкин И.Б. Вулканизм и колчеданные месторождения Южного Урала. М.: Наука, 1986. 270 с.
16. Злотник-Хоткевич А.Г. Минеральные продукты палагонитизации субмаринных базальтов и их роль в образовании и локализации колчеданных руд // Метасоматизм и рудообразование: сб. ст. М.: Наука, 1984. С. 160–172.
17. Рыкус М.В., Сначёв В.И. Особенности палеозойского углеродистого осадконакопления Сысертско-Ильменогорской зоны Южного Урала // Осадочные бассейны: закономерности строения и эволюции, минерагения: матер. 4 регионального Уральского литологического совещания. Екатеринбург: ИГиГ УрО РАН, 2000. С. 112–114.

REFERENCES

1. Skripchenko N.S. *Vulkanogenno-osadochnoe rudoobrazovanie (na primere kolchedannykh mestorozhdenii Severnogo Kavkaza)* [Volcanic-Sedimentary Ore Formation (on the Example of Pyrite Deposits of the North Caucasus)]. Moscow, Nedra Publ., 1966. 291 p. [in Russian].
2. Smirnov V.I. *Genезis endogennykh rudnykh mestorozhdenii* [Genesis of Endogenous Ore Deposits]. Moscow, Nedra, 1968. 719 p. [in Russian].
3. Vlasov G.M., Kompanichenko V.N., Malyshev Yu.F. *Magmatogenno-rudnye sistemy* [Magmatogenic Ore Systems]. Moscow, Nauka Publ., 1986. 252 p. [in Russian].
4. Rykus M.V. *Vulkanizm i metallogeniya Dzhuzinsko-Dombarovskogo paleovulkanicheskogo poyasa Yuzhnogo Urala* [Volcanism and Metallogeny of the Dzhuzinsko-Dombarovsky Paleovolcanic Belt of the Southern Urals]. Ufa, BNTs UrO RAN Publ., 1992. 171 p. [in Russian].
5. Rykus M.V., Snachev V.I. Paleovulkanicheskie usloviya obrazovaniya kolchedannogo orudneniya Akzharskogo rudnogo polya (Yuzhnyi Ural) [Paleovolcanic Conditions of Massive Sulphide Mineralization Formation of Akzharskoye Ore Field (Southern Urals)]. *Neftegazovoe delo — Petroleum Engineering*, 2018, Vol. 16, No. 4, pp. 40–50. DOI: 10.17122/ngdelo-2018-4-40-50. [in Russian].
6. Lyadskii P.V. *Rannegeosinklinal'nye vulkanogennye formatsii i kolchedannoe orudnenie Dombarovskogo raiona: dis. kand. geol.-mineral. nauk* [Early Geosynclinal Volcanogenic Formations and Pyrite Mineralization of the Dombarovsky Region: Cand. Geol. and Mineral. Sci. Diss.]. Sverdlovsk, 1986. 227 p. [in Russian].
7. Knyazev Yu.G., Knyazeva O.Yu., Snachev V.I., Zhdanov A.V., Karimov T.R., Aidarov E.M., Masagutov R.Kh., Arslanova E.R. *Gosudarstvennaya geologicheskaya karta Rossiiskoi Federatsii. Masshtab 1:1000000 (3-e pokolenie). Seriya Ural'skaya. List N-40 (Ufa). Ob'yasnitel'naya zapiska* [State Geological Map of the Russian Federation. Scale 1:1,000,000 (3rd Generation). Ural Series. Sheet N-40 (Ufa). Explanatory Note]. Saint-Petersburg, FGBU «VSEGEI» Publ., 2013. 512 p. [in Russian].
8. Snachev V.I., Puchkov V.N., Savelev D.E., Moseichuk V.M., Snachev A.V., Shyanova A.A., Rykus M.V. Rudonosnost' uglerodistykh otlozhenii severnoi poloviny Mayardakskogo i Yamantauskogo antiklinoriev [Ore Content of Carbonaceous Deposits in the Northern Half of the Mayardak and Yamantau Anticlinoria]. *Geologicheskii sbornik — Geological Collection*, 2007, No. 6, pp. 227–232. [in Russian].
9. Savelev D.E., Snachev A.V., Puchkov V.N., Snachev V.I. Petrogeokhimicheskie i geodinamicheskie osobennosti formirovaniya ordoviksko-rannesiluriiskikh

bazal'tov vostochnogo sklona Yuzhnogo Urala [Petrogeochemical and Geodynamic Features of the Formation of the Ordovician-Early Silurian Basalts on the Eastern Slope of the Southern Urals]. *Geologicheskii sbornik — Geological Collection*, 2006, No. 5, pp. 86–104. [in Russian].

10. Snachev A.V., Puchkov V.N., Snachev V.I., Savelev D.E., Bazhin E.A. Bol'shakovskii gabbrovyy massiv fragment Yuzhno-Ural'skoi zony rannekamennougol'nogo rifta [Bol'shakovskii Gabbro Massif as a Fragment of the Southern Urals Zone of Early Carboniferous Rift]. *Doklady Akademii nauk — Doklady Akademii Nauk*, 2009, Vol. 429, No. 1, pp. 79–81. [in Russian].

11. Tatarinov P.M. *Usloviya obrazovaniya mestorozhdenii rudnykh i nerudnykh poleznykh iskopaemykh* [Conditions for the Formation of Deposits of Ore and Nonmetallic Minerals]. Moscow, Gosgeologtekhizdat Publ., 1955. 280 p. [in Russian].

12. Lindgren V. *Posledovatel'nost' mineralov i temperatura ikh obrazovaniya v rudnykh mestorozhdeniyakh magmaticheskogo tipa* [The Sequence of Minerals and the Temperature of Their Formation in Ore Deposits of the Magmatic Type]. Leningrad, TsBG Publ., 1938. 40 p. [in Russian].

13. Buerger N.W. The Unmixing of Chalcopyrite from Sphalerite. *American Mineralogist*, 1934, Vol. 19, pp. 526–530.

14. Pshenichnyi G.N., Khairtdinov I.A., Andriyanova N.A. Temperatury i glubiny rudoobrazovaniya na mestorozhdeniyakh kolchedannoi formatsii Yuzhnogo Urala

[Temperatures and Depths of Ore Formation in the Pyrite Deposits of the Southern Urals]. *Tezisy dokladov k vsesoyuznomu soveshchaniyu «Osnovnye parametry prirodnykh protsessov endogennoho rudoobrazovaniya»* [Abstracts of Reports for the All-Union Meeting «The Main Parameters of Natural Processes of Endogenous Ore Formation»]. Novosibirsk, IGIG SO AN SSSR Publ., 1977, pp. 19–26. [in Russian].

15. Seravkin I.B. *Vulkanizm i kolchedannye mestorozhdeniya Yuzhnogo Urala* [Volcanism and Pyrite Deposits of the Southern Urals]. Moscow, Nauka Publ., 1986. 270 p. [in Russian].

16. Zlotnik-Khotkevich A.G. Mineral'nye produkty palagonitizatsii submarinnykh bazal'tov i ikh rol' v obrazovanii i lokalizatsii kolchedannykh rud [Mineral Products of Palagonitization of Submarine Basalts and Their Role in the Formation and Localization of Pyrite Ores]. *Sbornik statei «Metasomatizm i rudoobrazovanie»* [Collection of Articles «Metasomatism and Ore Formation»]. Moscow, Nauka Publ., 1984, pp. 160–172. [in Russian].

17. Rykus M.V., Snachev V.I. Osobennosti paleozoiskogo uglerodistogo osadkonakopleniya Sysertsko-Il'menogorskoi zony Yuzhnogo Urala [Features of the Paleozoic Carbonaceous Sedimentation of the Sysertsko-Il'menogorsk Zone of the Southern Urals]. *Materialy 4 regional'nogo Ural'skogo litologicheskogo soveshchaniya «Osadochnye basseiny: zakonomernosti stroeniya i evolyutsii, minerageniya»* [Materials of the 4th Regional Ural Lithological Meeting «Sedimentary Basins: Patterns of Structure and Evolution, Minerageny»]. Ekaterinburg, IGIG UrO RAN Publ., 2000, pp. 112–114. [in Russian].

СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРАХ

ABOUT THE AUTHORS

Рыкус Михаил Васильевич, канд. геол.-минерал. наук, доцент кафедры «Геология и разведка нефтяных и газовых месторождений», УГНТУ, г. Уфа, Российская Федерация

Mikhail V. Rykus, Candidate of Geological and Mineralogical Sciences, Assistant Professor of Geology and Exploration of Oil and Gas Field Department, USPTU, Ufa, Russian Federation

e-mail: rykusmikhail@mail.ru

Сначёв Владимир Иванович, д-р геол.-минерал. наук, профессор, главный научный сотрудник, Институт геологии УФИЦ РАН, г. Уфа, Российская Федерация

Vladimir I. Snachev, Doctor of Geological and Mineralogical Sciences, Professor, Chief Researcher, Institute of Geology, UFRS RAS, Ufa, Russian Federation

e-mail: SAVant@inbox.ru