

**В.И. Сначёв**

Институт геологии УФИЦ РАН, г. Уфа

**ДИФфуЗИОННЫЕ ЗОНЫ В ПИРИТ-СФАЛЕРИТОВОЙ  
АССОЦИАЦИИ КОЛЧЕДАННЫХ МЕСТОРОЖДЕНИЙ  
ВЕСЕННЕЕ И ТАШ-ЯР (ЮЖНЫЙ УРАЛ)**

В статье на примере Таш-Ярского и Весеннего месторождений рассмотрен принципиально новый подход к проблеме диффузии элементов на границах рудных минералов пирит-сфалеритовой ассоциации, что позволяет достаточно быстро и с большой точностью вычислять температуры и продолжительность преобразований рудных объектов, подобно вышеуказанным, оказавшимся в зоне термального воздействия интрузивных тел (Осеннее, Авангард и многие другие), либо испытавших глубокий региональный метаморфизм (месторождения Карелии, Прибайкалья, Енисейского кряжа).

*Ключевые слова: Таш-Ярское месторождение, Весеннее месторождение, пирит-сфалеритовая ассоциация, диффузионные зоны, температура, продолжительность преобразования, контактовый метаморфизм, колчеданные руды.*

**DOI: 10.17072/chirvinsky.2022.239**

В последнее время в печати появился ряд статей, посвященных изучению диффузии компонентов на границах рудных минералов. Этот интерес вызван той огромной информацией о процессах пострудного преобразования, которую несут в себе межфазовые диффузионные зоны. Методика исследований, причины явления диффузии и его математическая модель рассмотрены Ю.И. Деминим и Нат.Е. Сергеевой [1]. В работе показано, что содержание диффундирующего элемента непосредственно на границе зерен двух минералов является функцией температуры, а ширина зоны диффузии связана с длительностью термального воздействия. Последнее положение разработано явно недостаточно, ибо приведенный в данной работе разброс расчетных значений коэффициента диффузии для фиксированной температуры охватывает несколько порядков и не позволяет даже приблизительно оценить длительность преобразований рудных объектов.

В предлагаемой читателю работе автор сделал попытку оценить с помощью методики, предложенной Ю.И. Деминим и Нат.Е. Сергеевой, интенсивность контактового метаморфизма руд Весеннего и Таш-Ярского месторождений. Эти объекты выбраны потому, что рудные тела

данных месторождений в разной степени метаморфизованы и для различных их частей известны температуры и длительность преобразования, полученные в результате математического моделирования тепловых полей близ расположенных гранитных массивов.

Все исследования проведены на рентгено-спектральном микрозонде «Cameca» MS-46 [3]. Изучение состава приконтактных зон минералов осуществлялось в основном измерением содержания интересующего элемента по профилям, перпендикулярным границе их раздела, через 10 мкм вплоть до его полного выравнивания. Во избежание захвата зондом соседнего минерала измерения проводились не ближе 5–10 мкм от контакта [6].

**Весеннее медноколчеданное месторождение** располагается в пределах Домбаровского рудного района на стыке двух крупных структур Южного Урала: Магнитогорского мегасинклинория и Восточно-Уральского поднятия, непосредственно на восточном контакте послерудного Кошensaйского гранитного массива. Залегают месторождения в породах контрастной риолит-базальтовой формации среднего девона [4]. Такая геологическая позиция месторождения обусловила появление ряда весьма существенных его отличий от типичных колчеданных месторождений Южного Урала. Наиболее отчетливо эти отличия проявились в составе и строении рудовмещающих пород, подвергшихся перекристаллизации с образованием новых высокотемпературных минеральных парагенезисов, содержащих кордиерит, гранат, биотит, антофиллит, роговую обманку.

На месторождении известно несколько рудных залежей. Сложены они массивными рудами, и их границы с вмещающими породами достаточно резкие. Минеральный состав руд довольно простой: главные минералы – пирит, халькопирит, сфалерит; редкие – пирротин, магнетит, арсенопирит, молибденит.

Изучение содержания главных элементов и элементов-примесей в рудообразующих минералах и в особенности электролитическое их травление позволили установить, что пирит Весеннего месторождения в разной степени перекристаллизован. Причем соотношения между незональной перекристаллизованной каймой и зональным центром зерен могут быть самыми разнообразными. Так, в приближенных к массиву частях рудных тел и в зонах повышенного расщепления развит в основном почти нацело перекристаллизованный пирит, а на самых удаленных участках рудных тел пирит не подвергся каким-либо изменениям. Не было на месторождении и заметного переотложения рудного вещества. Подтверждается это не только перечисленными выше методами,

но и математическим моделированием теплового поля Кошенсайского массива. Было установлено, что тепловое поле на участке месторождения имело невысокие градиенты ( $0,1-0,4^{\circ}$  С/м) и характеризовалось кратковременностью воздействия на руды. Тепловое поле с такими параметрами не могло привести к переотложению рудного вещества. Учет процессов возможного переотложения на объектах, подобно Весеннему месторождению испытавших метаморфические преобразования, совершенно необходим потому, что переотложенные руды, формирующиеся на регрессивной ступени теплового поля и не подвергшиеся термальной обработке, вносят путаницу в интерпретацию данных по диффузионным зонам в рудных минералах и приводят к заведомо заниженным температурам и заниженным значениям продолжительности их воздействия.

**Таш-Ярское колчеданно-полиметаллическое месторождение** располагается в пределах Учалинского рудного района близ северного контакта Ахуново-Карагайского гранитного массива [9]. В процессе контактового метаморфизма в рудах и вмещающих их породах образовались новые высокотемпературные минеральные парагенезисы, содержащие соответственно пирротин, арсенопирит, магнетит, кордиерит, гранат, биотит, андалузит, актинолит. Рудовмещающими породами на Таш-Ярском месторождении являются интенсивно расланцованные и метаморфизованные эффузивные и субвулканические риолитовые порфиры, перекрытые маломощной толщей миндалекаменных базальтовых порфиров, имеющих островодужные петрогеохимические характеристики [8]. Среди них отмечены и маломощные прослой углеродистых сланцев, вмещающих золото-редкометальное оруденение (Буйдинский участок) [2, 5, 7]. Рудная зона представлена серией субмеридиональных жил, выклинивающихся по падению и простиранию и разделенных блоками слабо расланцованных пород, не содержащих существенной минерализации. Падение зоны запад – северо-западное под углом  $60-80^{\circ}$ . Отмечаются также субширотные рудные тела, формирование которых генетически связано со становлением Ахуново-Карагайского гранитного массива [9].

Главными минералами руд являются пирит, сфалерит, халькопирит и пирротин, второстепенными – галенит и магнетит. Среди редких минералов можно отметить блеклые руды, молибденит, арсенопирит, пентландит. Пирит Таш-Ярского месторождения в разной степени перекристаллизован. В приконтактных частях массива рудные тела в основном почти нацело сложены перекристаллованным пиритом. С удалением от гранитоидов степень перекристаллизации пирита уменьшается [2]. Кроме того, часть рудных тел в обрамлении Ахуново-Карагайского массива образована регенерированными рудами, что подтверждается не

только электролитическим травлением пирита, но и математическим моделированием динамики кристаллизации Ахуново-Карагайского массива. Установлено, что тепловое поле на участке месторождения было высокоградиентным, особенно в первые десятки тысяч лет с момента внедрения расплава, когда значения градиентов превышали  $1^{\circ}\text{C}/\text{м}$ , и только через 50 тыс. лет они уменьшились до  $0,8^{\circ}\text{C}/\text{м}$ . Поддерживать столь высокие градиенты в течение длительного времени помогло тепловое поле, смещавшееся в течение всего периода кристаллизации массива в направлении Таш-Ярского месторождения. В это время происходила перекристаллизация, экстракция и рассеяние рудного вещества по всей площади участка. Однако затем тепловое поле постепенно стабилизировалось, и, начиная где-то с 50–150 тыс. лет, оно прочно установилось на весьма продолжительный период времени, охватывающий около миллиона лет. На приближенные к массиву части рудных тел пришлось зона стабилизации температур около  $550^{\circ}\text{C}$ , на наиболее удаленные – зона стабилизации температур  $450\text{--}500^{\circ}\text{C}$ . Это не позволило всей массе экстрагированного рудного вещества рассеяться во вмещающие породы, а привело к выпадению и наложению его части в основном на ранее сформированные руды. Другая часть рудного вещества отложилась в зонах повышенного расланцевания и на контакты пород с резко различными физико-механическими свойствами (контакт миндалекаменных базальтовых порфиритов с подстилающими кислыми породами).

Обратимся к рис. 1, 2, на которых представлены графики зависимости железистости сфалерита в контакте с пиритом для образцов, взятых на разном удалении от контакта гранитных массивов. Все графики для Весеннего месторождения выполняются приблизительно на одном и том же значении содержания железа – около 1,8 %, для Таш-Ярского – 0,9 %, что соответствует, вероятно, концентрации железа в сфалерите до момента внедрения интрузивных тел. С приближением к Кошенсайскому массиву ширина зоны диффузии (до полного выравнивания) увеличивается с 15 до 300 мкм, для Ахуново-Карагайского массива – с 40 до 800 мкм. Меняется при этом в сторону увеличения и содержание железа непосредственно на границе сфалерита с пиритом. На рис. 1, 2 хорошо видно, что на ширину зоны диффузии основное влияние оказывает температура и в меньшей степени продолжительность ее воздействия. Так, для Весеннего месторождения сфалерит, находившийся в течение 70 тыс. лет в области изотермы  $500^{\circ}\text{C}$ , имеет незначительную ширину диффузионной зоны железа. Зоны такой ширины, вообще говоря, трудно улавливаются микрозондом и не могут быть использованы для точных расчетов коэффициента диффузии. Несколько более

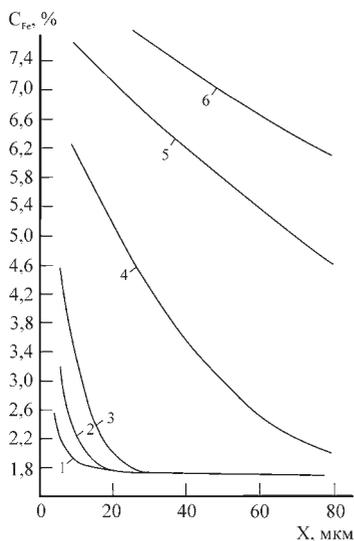


Рис. 1. Изменение железистости сфалерита в контакте с пиритом Весеннего месторождения.

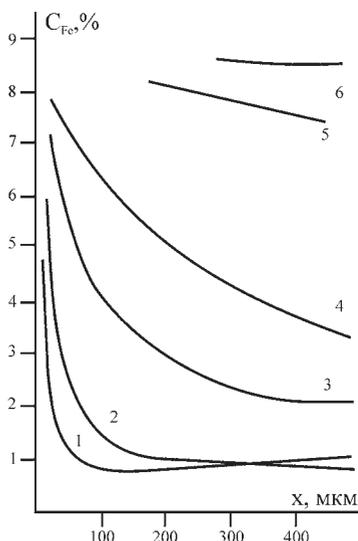


Рис. 2. Распределение железа в сфалерите на контакте с пиритом месторождения Таш-Яр

высокие температуры (600°C), но просуществовавшие на участке на порядок меньшее время, вызвали образование зоны диффузии в 15–20 раз шире. На таких участках в сфалерите размером до 0,1–0,3 мм и меньше содержание железа по всей площади зерен полностью выровнено. Для Таш-Ярского месторождения сфалерит, находившийся в течение 0,9–1,0 млн. лет в области изотермы 500°C, имеет незначительную ширину диффузионной зоны [2]. Более высокие температуры (600–620°C), воздействие которых продолжалось около 200 тыс. лет, вызвали образование зоны диффузии в 20 раз шире.

Используя зависимость максимальной железистости сфалерита от температуры, установленную Ю.И. Деминым и Нат.Е. Сергеевой [1], для руд Весеннего и Таш-Ярского месторождений получены высокие температуры преобразования, соответственно 470–620 и 500–610°C. Как видим, они почти полностью совпадают с температурами, полученными для тех же частей рудных тел методом математического моделирования теплового поля.

Таким образом, на примере Таш-Ярского и Весеннего месторождений рассмотрен принципиально новый подход к проблеме диффузии элементов на границах рудных минералов, что позволяет достаточно быстро и с большой точностью вычислять температуры и продолжительность

преобразований рудных объектов, подобно вышеуказанным, оказавшимся в зоне термального воздействия интрузивных тел (Осеннее, Авангард и многие другие), либо испытавших глубокий региональный метаморфизм (месторождения Карелии, Прибайкалья, Енисейского кряжа).

*Работа выполнена в рамках Государственного задания по теме № FMRS-2022-0011.*

#### *Библиографический список*

1. Демин Ю. И., Сергеева Нат. Е. Межфазовые диффузионные зоны в рудообразующих минералах как показатель интенсивности преобразования колчеданных месторождений // Геология рудных месторождений. 1981. № 5. С. 65–78.
2. Демин Ю. И., Сначев В. И. Тепловые поля Ахуновского гранитного массива и закономерности размещения в них оруденения // Докл. Акад. наук СССР. 1981. Т. 261. № 1. С. 152–156.
3. Зильберман А. Г., Богословский И. Д. К расчету поправок количественного микро-рентгеноспектрального анализа // Заводская лаборатория. 1972. № 6. С. 641–768.
4. Исмагилов М. И., Исмагилова М. З. Соотношение колчеданного оруденения, околорудного метасоматоза и контактового метаморфизма на примере месторождения Весеннее // В кн.: Магматизм и рудообразование. М.: Недра. 1975. С. 202–206.
5. Ковалев С. Г., Сначёв В. И., Высоцкий И. В., Рыкус М. В. О новом типе благороднометаллической минерализации на западном склоне Южного Урала // Руды и металлы. 1997. № 6. С. 27–33.
6. Лабораторные методы исследований минералов и пород / М.: МГУ. 1978. 272 с.
7. Рыкус М. В., Сначёв В. И., Сначёв А. В. Золото в дислоцированных углеродистых толщах палеоконтинентального сектора Южного Урала // Сборник: Геологическая служба и горное дело Башкортостана на рубеже веков. 2000. С. 179–191.
8. 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 № 5. ИГ УНЦ РАН. Уфа: ООО «ДизайнПолиграфСервис». 2006. С. 86–104.
9. Яцинин С. Б. Таш-Ярское сульфидное рудопоявление. В кн.: Геология, минералогия и геохимия сульфидных месторождений Южного Урала. Уфа: БФАН СССР. 1970. вып. 10. С. 135–141.

## ZONES IN THE PYRITE-SPHALERITE ASSOCIATION OF SULFIDE DEPOSITS VESENNEE AND TASH-YAR (SOUTH URAL)

**V. I. Snachev**

*SAVant@inbox.ru*

Based on the example of the Tash-Yar and Vesennnee deposits, a fundamentally new approach to the problem of diffusion of elements at the boundaries of ore minerals of the pyrite-sphalerite association is considered in the article, which makes it possible to calculate the temperatures and duration of transformations of ore objects, the impact of intrusive bodies (Osennee, Avangard and many others), or experienced deep regional metamorphism (deposits of Karelia, the Baikal region, the Yenisei ridge).

*Keywords: Tash-Yar deposit, Vesennnee deposit, pyrite-sphalerite association, diffusion zones, temperature, transformation duration, contact metamorphism, pyrite ores.*