

УДК 553.22+553.315(470.5)

## Стадийность сидеритообразования в Бакальском рудном поле

*Демчук И.Г., Крупенин М.Т., Сазонов В.Н.*  
*Институт геологии и геохимии УрО РАН*

В работе на примере сидеритовых месторождений Бакальского рудного поля приводятся данные, позволяющие последовательно рассмотреть процесс многоэтапного преобразования доломита в сидерит. Используются специально разработанные рентгеновские методы по определению содержания доломита в сидеритовой области и сидеритовых вростков в доломитовой области подтверждает метасоматическую природу процесса рудообразования. Указаны области измерения максимальных содержаний  $Fe^{2+}$  в анкеритах, которые принципиально можно использовать как индикаторы Р-Т условий процесса. Для Бакальских месторождений максимальное содержание FeO в контактовых анкеритах составляет  $10,7 \pm 0,8$  мас. %.

### ВВЕДЕНИЕ

Бакальское рудное поле объединяет группу сидеритовых месторождений, приуроченных к отложениям бакальской свиты нижнего рифея в северной части Башкирского мегантиклинория на Южном Урале. Бакальская группа относится к сидеритовым гидротермально-метасоматическим месторождениям и является крупнейшей в мире среди объектов данного класса с подсчитанными запасами около 1 млрд тонн. Месторождение представляет собой совокупность пластообразных и линзовидных сидеритовых залежей, локализованных в карбонатных пластах терригенно-карбонатной бакальской свиты, образующей полого падающую к юго-западу синклиналь шириной до 10 км. Мощность залежей достигает 80 м, протяженность до 2 км. Отмечается структурный контроль оруденения в виде многоэтажного расположения залежей в различных пачках бакальской свиты, а также в приуроченности их к поверхности межформационного стратиграфического несогласия с кварцитовидными песчаниками среднего рифея. Метасоматические сидеритовые тела имеют тупые и ступенчатые контакты с вмещающими карбонатными породами, развиваются по карбонатным отложениям различных осадочных фаций, а также по пластообразным магнезитовым залежам [Крупенин, 1999]. Детальными исследованиями установлено наличие устойчивой метасоматической зональности: сидерит-доломит-вмещающий известняк.

## ИЗУЧЕНИЕ ДОЛОМИТ-СИДЕРИТОВЫХ КОНТАКТОВ

С целью рассмотрения возможного механизма формирования бакальских сидеритовых руд нами изучено 6 образцов из зоны контактов доломита с сидеритом, отобранных в карьерах Бакальских месторождений (образцы Vul-1, Vul-4, 119k - из верхнебакальской пачки в Восточно-Буландихинском карьере, CI-1, CI-2, kont-1 из шуйдинской пачки в карьере Центральный Иркутскан). Все образцы были разделены на зоны, параллельные визуально наблюдаемому контакту доломита с сидеритом (рис.) и

детально изучены методом рентгенографии с использованием в отдельных случаях данных микронзондирования, термографии и химических анализов. Рентгеновские характеристики каждой зоны рассчитывались по дифрактограммам, снятым с порошков, полученных путем многократного сверления образца победитовым сверлом (диаметр сверла 4 мм, расстояние между зонами 2-4 мм). Всего исследовано 4-7 зон в доломит-анкеритовой области (экзоконтакт) и 2 зоны в сидеритовой области (эндоконтакт). Использование методов, предложенных И.Г. Демчук (1985, 1992), позволило сделать ряд интересных выводов относительно метасоматической природы процессов формирования руд, величины предельного насыщения анкерита железом как индикатора существовавших Р-Т условий, а также детально обсудить многостадийный процесс преобразования доломита в сидерит.

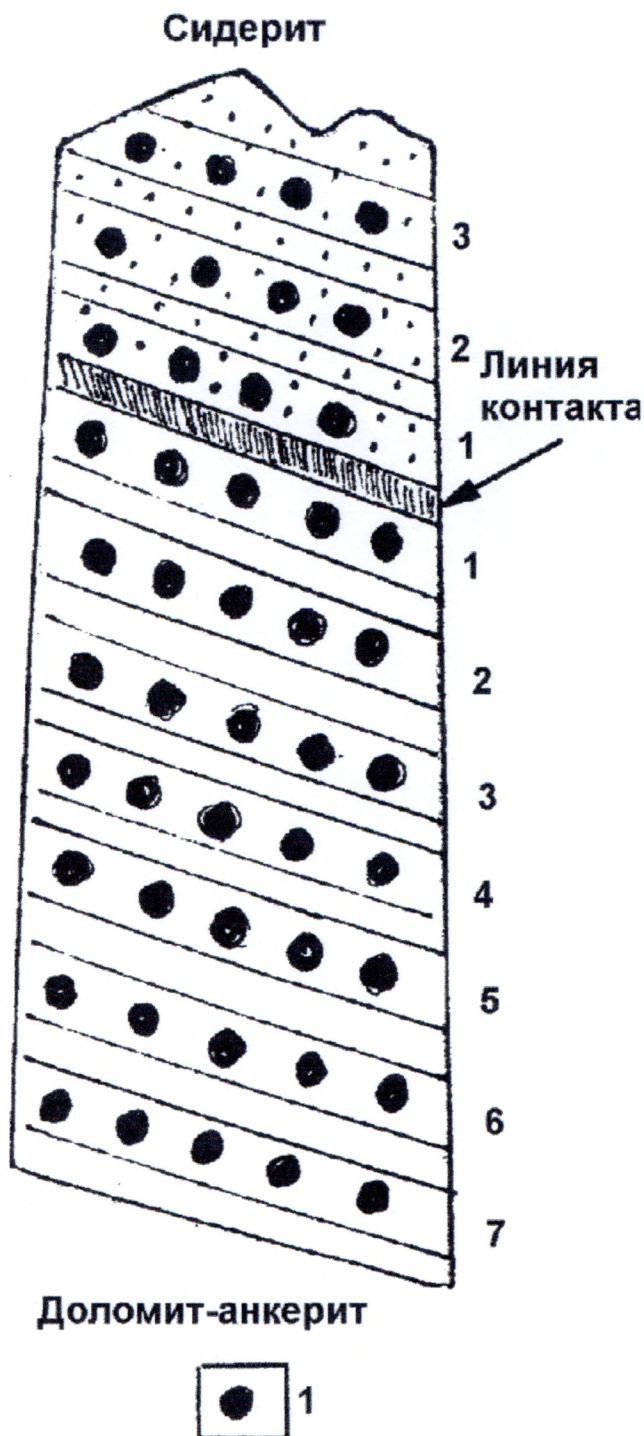


Рис. Схема опробования образцов.

1 - точки сверления, образующие линейную зону опробования;  
цифровые обозначения - отсчет номера зоны от линии контакта в сторону сидерита (эндоконтакт) и анкерита-доломита (экзоконтакт);  
вещество из всех точек сверления каждой зоны представлено одной пробой для анализа.

Данные рентгенографии для доломит-сидеритовых контактов

| № зоны от<br>линии<br>контакта | K*=<br>I <sub>015</sub> /<br>I <sub>110</sub> | Dm**+A<br>нк,<br>FeO,<br>Мас.% | Sd***<br>Мас.% | Dm,<br>Мас.% | FeO<br>мас%<br>в Ank,<br>max | D <sub>633</sub> ,<br>Å | MgCO <sub>3</sub> ,<br>Мол%<br>в Sd |
|--------------------------------|---|--------------------------------|----------------|--------------|------------------------------|-------------------------|-------------------------------------|
| <b>Bul-1</b>                   |   |                                |                |              |                              |                         |                                     |
| 7                              | 0,40  | 8                              | 0              |              |                              | 0,9617                  |                                     |
| 3                              | 0,42  | 8                              | 0              |              |                              | 0,9617                  |                                     |
| 2 экзо-<br>1 контакт           | 0,40<br>0,42                                  | 8<br>8                         | 2-3<br>10      |              | 11,0                         | 0,9621<br>0,9626        |                                     |
| 1 эндо-<br>2 контакт           | 1,0<br>-                                      | 0<br>-                         | 73<br>100      | 27<br>0      |                              |                         |                                     |
| <b>Bul-4</b>                   |   |                                |                |              |                              |                         |                                     |
| 5                              | 0,47  | 6,7                            | 0              |              |                              | 0,9620                  |                                     |
| 3                              | 0,39  | 8,2                            | 0              |              |                              | 0,9616                  |                                     |
| 2 экзо-<br>1 контакт           | 0,33<br>0,4-0,5                               | 9,5<br>-                       | 5<br>30        |              | 10,0                         | 0,9622<br>-             |                                     |
| 1 эндо-<br>2 контакт           | -<br>-  | -<br>-                         | -<br>95        | -<br>5       |                              |                         | 18                                  |
| <b>k-119</b>                   |   |                                |                |              |                              |                         |                                     |
| 4                              | 0,5   | 5,8                            | 0              |              |                              | 0,9620                  |                                     |
| 2 экзо-<br>1 контакт           | 0,43<br>0,37                                  | 7,7<br>8,7                     | 0<br>5-10      |              | 11,6                         | 0,9624<br>0,9620        |                                     |
| 1 эндо-<br>2 контакт           | 1,0<br>-                                      | 0<br>-                         | 75<br>до 100   | 25<br>0      |                              |                         | 26<br>32 и 10                       |
| <b>CI-1</b>                    |   |                                |                |              |                              |                         |                                     |
| 7                              | 0,52  | 5,8                            | 0              |              |                              | 0,9613                  |                                     |
| 4                              | 0,55  | 5,8                            | 0              |              |                              | 0,9617                  |                                     |
| 2 экзо-<br>1 контакт           | 0,52<br>0,54                                  | 5,8<br>5,8                     | 0<br>2-3       |              | 11,6                         | 0,9618<br>0,9618        |                                     |
| 1 эндо-<br>2 контакт           | 0,85<br>-                                     | 0-1<br>-                       | 50<br>97       | 50<br>3-5    |                              |                         | -<br>14                             |
| <b>CI-2</b>                    |   |                                |                |              |                              |                         |                                     |
| 4                              | 0,50  | 6,5                            | 0              |              |                              | 0,9612                  |                                     |
| 3                              | 0,56  | 6,1                            | 0              |              |                              | 0,9612                  |                                     |
| 2 экзо-<br>1 контакт           | 0,43<br>0,43                                  | 7,7<br>7,7                     | 3<br>25        |              | 9,0                          | 0,9619<br>0,9629        |                                     |
| 1 эндо-<br>2 контакт           | >1,0<br>-                                     | 0<br>-                         | 90<br>до 100   | 10<br>следы  |                              |                         | 28<br>26                            |
| <b>Kont-1</b>                  |   |                                |                |              |                              |                         |                                     |
| 13                             | 0,95  | <1                             | 0              | До 100       |                              |                         |                                     |
| 11                             | 0,60  | 5,5                            | 0              |              |                              | 0,9623                  |                                     |
| 7                              | 0,50  | 6,5                            | 0              |              |                              | 0,9642                  |                                     |
| 5                              | 0,50  | 6,5                            | 0              |              |                              | 0,9637                  |                                     |
| 4                              | 0,30  | 11                             | 2              |              | 11,0                         |                         |                                     |
| 3                              | 0,27  | 11                             | 3              |              |                              |                         |                                     |
| 2 экзо-<br>1 контакт           | 0,27<br>0,30                                  | 11<br>11                       | 5<br>10-15     |              |                              | 0,9643                  |                                     |
| 1 эндо-<br>контакт             | -   | -                              | 97             | 3            |                              |                         | 23 (микронзонд)                     |

\* - K из (Демчук, 1992);

\*\* - Dm - доломит, Ank - анкерит;

\*\*\* - Sd - сидерит

Одним из условий применения методов рентгенографии для определения количества  $Fe^{2+}$  в решетке доломита является отсутствие  $Ca^{2+}$  и  $Mn^{2+}$  в позициях  $Mg^{2+}$ , что было уже показано в работах [Демчук, 1985; 1992; Демчук и др., 1996] по данному объекту. По коэффициенту  $K=I_{015}/I_{110}$  определяется общее содержание FeO независимо от того, представлен ли образец чистым анкеритом или является смесью минералов ряда доломит-(Fe-доломит)-анкерит. Измерение коэффициента K на шести исследованных контактах позволило сделать вывод, что железистость в доломит-анкеритовой области может не меняться вплоть до зоны контакта или постепенно нарастать. В приконтактной зоне содержания FeO изменяются от 5,8 до 11 мас.% для разных образцов. Объяснения таким колебаниям удалось найти при исследовании первой эндоконтактной зоны сидерита (см. рис.). Выяснилось, что в примеси к сидериту присутствует чистый безжелезистый доломит (FeO=0 мас.%). Количество доломита в этой зоне в разных образцах составляют: 3, 5, 10, 25, 27, 50 мас.%. Одновременное присутствие сидерита и чистого доломита (при больших содержаниях последнего) подтверждено и данными термического анализа (аналитик В.Г. Петрищева, ИГГ УрО РАН). Измерение параметров кристаллической решетки в доломит-анкеритовых областях по отражению  $d_{633}$ , ответственному за положение главного доломитового пика, показывает, что они в большинстве случаев совпадают с соответствующими для чистого безжелезистого доломита  $d_{633}=0,9620$  Е (таблица) [Демчук, 1985; 1992]. Присутствие чистого доломита наглядно подтверждает метасоматическую природу происходящего процесса: железистые растворы проникают по порам, микротрещинам доломитовой матрицы. Если пересчитать содержание FeO для всех приконтактных доломит-анкеритовых зон (4-6 мм) на анкерит (за вычетом чистого доломита), мы получим величину предельного насыщения анкерита железом, равную в среднем  $10,7\pm 0,8$  мас.% для всех шести образцов (см. табл.). Такая стабильность предельного насыщения железом контактового анкерита из различных точек рудного поля предполагает возможность использования этого параметра для разработки геотермометра. Таким образом, узкая (несколько миллиметров) зона сидерита в контакте характеризует один из этапов процесса сидеритизации, а именно, резкое разрушение анкеритовых зерен на границе. Уже следующая от контакта зона сидерита (на рис. зона 2) обнаруживает на всех образцах только следы доломита.

## ОБСУЖДЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ

Для моделирования поэтапного образования сидерита, обратимся к первому появлению сидеритовых вростков внутри доломитовой матрицы. Подробно на одном из образцов мы обсуждали эту стадию в работе (Демчук и др., 1996). Обобщение данных по шести исследованным контактам приводит к следующим выводам: первые сидеритовые вростки могут появиться на любом расстоянии от линии контакта (в сторону доломит-анкеритовой области), но чаще во второй зоне. Количество таких сидеритовых включений, накопленное к приконтактной зоне, колеблется от образца к образцу от 2-3% до 25-30% (см. табл.). Отмечается тенденция: чем больше доломита в доломит-анкеритовой матрице, тем меньшее количество сидеритовых включений необходимо на границе для того, чтобы начался процесс резкого разрушения анкеритовых зерен. Вероятно, такой состав обеспечивает более интенсивные напряжения вдоль границы, и достаточно небольшого толчка (количество сидеритовых вростков), чтобы ситуация изменилась кардинальным образом. Появление первых сидеритовых включений связано с разрушением анкерита, а не выпадением из раствора, что наглядно демонстрируется на дифрактограммах пропорциональным снижением интенсивностей анкеритовых пиков с усилением сидеритовых. Именно этот этап является начальным, ибо появление достаточного количества сидеритовых вростков в доломит - анкеритовой матрице перед

---

поверхностью контакта является необходимым условием начала второго этапа, который проходит непосредственно на границе. Он связан с резким разрушением всех анкеритовых зерен и ранее этот процесс мы назвали "обвальной" сидеритизацией.

Понять роль сидеритовых включений как катализатора, необходимого для "ломки" границы, можно, если учесть, что объем элементарной ячейки кристаллической решетки сидерита значительно меньше, чем у доломита-анкерита, поэтому появление сидеритовых вростков будет обеспечивать более свободное поступление железосодержащих растворов.

Наконец, третий этап, который можно назвать равновесным, завершается уже во второй сидеритовой зоне. Освободившаяся после "ломки" границы масса зерен чистого доломита вступает в активное взаимодействие с раствором. Во всех образцах на расстоянии примерно 10 мм от линии эндоконтакта в сидерите остаются только следы доломита.

Измерение параметров кристаллической решетки сидеритов показало, что соответствующие пики на дифрактограммах расщеплены или очень широкие, т. е. фиксируется одновременное присутствие сидеритов разного состава (по содержанию  $MgCO_3$ ). Это обстоятельство является косвенным подтверждением многоступенчатости образования сидерита.

Итак, по параметрам кристаллической решетки сидерита можно общепринятым методом определить его состав. В данном случае мы имеем дело с сидероплезитом ( $MgCO_3 < 30\%$ ), что подтверждается данными химических анализов других образцов месторождения и частично микронзондовым методом на одном из исследованных контактов [Демчук и др., 1996]. Поскольку третий завершающий этап сидеритизации мы можем считать равновесным, то вправе воспользоваться экспериментальными данными В.Йоханнеса [Johannes, 1969] по определению температуры образования сидерита с учетом его состава. Так как содержание  $MgCO_3$  в решетке сидерита составляет менее 30%, то температура - около  $250^\circ C$ . Вывод о незначительном влиянии давления делается как этим автором, так и другими [Johannes, 1969; Мартынов, 1990]

Расчет предельного насыщения анкерита железом на шести коях: 3, 5, 10, 25 показал, что этим параметром можно пользоваться как индикатором P-T условий образования сидерита. Применение метода микронзондирования следует проводить в узкой приконтактовой доломит-анкеритовой зоне. Подобные определения на месторождениях с известными температурными условиями дадут возможность построить графическую зависимость  $FeO\%_{анк} - T^\circ C$ , которой можно пользоваться, как термометром.

## ВЫВОДЫ

1. Установлена этапность процессов метасоматического сидеритообразования:
  - а) образование зоны Fe-доломита-анкерита в доломитовой матрице;
  - б) возникновение первых сидеритовых вростков внутри доломит-анкеритовой матрицы;
  - в) резкое разрушение всех анкеритовых зерен на контакте с образованием сидерита, сохранение зерен чистого доломита;
  - г) бурное взаимодействие оставшихся зерен чистого доломита с флюидом, полная сидеритизация (процесс развивается до достижения равновесия).
2. Полагается, что предельное насыщение анкерита железом можно использовать как индикатор P-T условий образования сидерита. При этом, измерения состава карбонатных фаз следует проводить в узкой приконтактовой доломит-сидеритовой зоне. Подобные определения на месторождениях с известными температурными условиями дадут возможность построить графическую зависимость  $FeO\%_{анк}/T^\circ C$ , которой можно пользоваться как термометром.

---

3. Поскольку содержания  $MgCO_3$  в сидеритах не превышает 30%, то, пользуясь данными В.Йоханнеса [Johannes, 1969] можно предполагать температуру рассмотренного процесса - около 250°C.

*Выполняется при частичной поддержке гранта РФФИ 00-05-64497.*

#### Литература

1. Демчук И.Г. Количественное определение изоморфного железа в анкеритах и железистых доломитах методом рентгеноструктурного анализа // Докл.АН СССР. 1985. Т. 283. №4. С. 981-984.
2. Демчук И.Г. Рентгенографическое исследование изоморфизма в доломитах // Изв. РАН. Сер. Геол.. 1992. № 10. С. 153-158.
3. Демчук И.Г., Сазонов В.Н., Крупенин М.Т. Механизм формирования бакальских сидеритовых руд (Южный Урал) // Ежегодник-1995/ Екатеринбург: ИГТ УрО РАН, 1996. С. 143-147.
4. Карбонаты: минералогия и геохимия / Под ред. Дж. Ридера. М.: Мир, 1987. 296 с.
5. Крупенин М.Т. Условия формирования сидеритоносной бакальской свиты нижнего рифея (Южный Урал): Екатеринбург, УрО РАН, 1999. 256 с.
6. Мартынов К.В. Экспериментальное изучение распределения Mg и Fe между твердыми растворами анкерита и брейнерита в системе  $MgCO_3$ - $CaCO_3$ - $FeCO_3$  при 250-450°C и термодинамические свойства анкерита // Геохимия, 1990. № 12. С. 1688-1695.
7. Johannes W. Siderit-Magnesit-Mishkristallbildung in System  $Mg^{2+}$ - $Fe^{2+}$ - $CO_3^{2-}$ - $Cl_2^{2-}$ - $H_2O$  // Contr.Mineral. and Petrol. 1969, 21. P. 3113-318.