

**ГЕОХИМИЯ И МИНЕРАЛОГИЯ СЕРЫ  
В ПОРОДАХ ЖЕЛЕЗИСТО-КРЕМНИСТО-СЛАНЦЕВОЙ ФОРМАЦИИ  
В ПРЕДЕЛАХ СТОЙЛЕНСКОГО МЕСТОРОЖДЕНИЯ КМА****В. В. Абрамов, В. С. Кузнецов, О. Г. Резникова***Воронежский государственный университет**Поступила в редакцию 16 сентября 2011 г.*

**Аннотация.** В статье показаны основные особенности распределения серы и основных ее носителей – сульфидных минералов в различных типах железистых кварцитов, сланцах и окисленных рудах Стойленского месторождения КМА. Установлены взаимосвязи между содержанием серы в породах в зависимости от палеофациальных условий седиментации исходных осадков, а также показана роль наложенных эпигенетических процессов.

**Ключевые слова:** геохимия, сера, сульфиды, железистые кварциты.

**Abstract.** In article the basic features of distribution of sulfur and its basic carriers – sulphidic minerals in various types of ferriferous quartzites, slates and the oxidized ores of Stojlensky deposit KMA are shown. Interrelations between the sulfur maintenance in breeds depending on paleofacies conditions sedimentation initial deposits are established, and also a role imposed genesis processes are established.

**Key words:** geochemistry, sulfur, sulfides, ferriferous quartzites.

**Введение**

В связи с современными требованиями черной металлургической промышленности к промпродукту обогатительных комплексов разрабатываются новые технологии получения высококачественной стали и новые стандарты технических требований к химическим параметрам товарного концентрата горно-обогатительных комбинатов, в которых предусмотрено снижение содержания кремнезема и особенно серы как главных вредных компонентов. Одним из путей повышения качества товарной продукции является снижение концентраций серы в поставляемой исходной руде, что предполагает установление основных закономерностей размещения серы и создания целостной картины ее распределения в рудном массиве.

**Краткая геологическая характеристика  
Стойленского месторождения**

Стойленское месторождение железных руд является типичным представителем железисто-кремнисто-сланцевой формации в составе курской серии нижнего протерозоя. Курская серия мощностью до 1000 м представлена внизу кварцитопесчаниками и кварц-сланцевыми сланцами стойленской свиты, слагающими крылья Стойленской синклинали;

ли; сверху – железистыми кварцитами и сланцами коробковской свиты, приуроченными к ядерной части синклинали. Коробковская свита сложена на 60 % железистыми кварцитами, которые формируют две железорудные подсвиты, разделенные нижней сланцевой подсвитой. Верхняя сланцевая подсвита на месторождении отсутствует [1].

**Распределение серы в породах и рудах  
Стойленского месторождения**

Изучение минералогии и особенностей распределения серы в породах Стойленского месторождения проводилось в рамках совместных с ОАО «СГОК» научно-исследовательских работ в 2008–2009 гг. В пределах контура обрабатываемого карьера производился отбор образцов железных руд и вмещающих пород. Полученный каменный материал послужил основой для проведения аналитических исследований по изучению геохимического фона серы. В ходе работ было отобрано свыше 200 проб различных типов железных руд и вмещающих пород. По каждой пробе производился анализ содержания серы, общего и магнитного железа, изготавливались прозрачные и полированные шлифы. Полученные результаты химических анализов содержания серы, а также железа магнитного и общего обработаны с применением математических методов исследования.

Определение закона распределения серы проводилось методом оценки асимметрии ( $(r_3)$  – степень асимметричности кривой распределения) и эксцесса ( $(r_4)$  – мера крутизны кривой распределения) для последующего расчета фоновых и аномальных содержаний исследуемого компонента, что также позволяет сделать некоторые предварительные выводы о разнообразии сульфидной минерализации в исследуемых породах. Преимуществом этого метода является наличие строгих критериев

$$(t_1 = \frac{|r_3|}{\sqrt{6/n}}; t_2 = \frac{|r_4|}{\sqrt{24/n}}), \text{ где } n - \text{объем}$$

выборки), значения которых при нормальном распределении не должны превышать  $|\pm 3|$  [2–4].

При нормальном распределении в качестве фонового значения выступает среднее арифметическое, а стандартное отклонение ( $\delta$ ) характеризует разброс изучаемой величины. В случае логнормального распределения компонента параметром, характеризующим фоновое значение, является среднее геометрическое, а стандартным отклонением логарифмированных значений выступает стандартный множитель (E).

В табл. 1 приведены результаты расчетов законов распределения в выборках, соответствующих основным типам горных пород, встреченных и описанных при картировании Стойленского карьера.

Закон распределения серы в слабородных, силикатно-магнетитовых, полуокисленных железистых кварцитах нормальный; в сланцах, богатых рудах и окисленных кварцитах – логнормальный, но близкий к нормальному; в магнетитовых, магнетитовых с гематитом, гематит-магнетитовых – логнормальный, существенно отличающийся по значениям критериев  $t_1$  и  $t_2$ .

Большинство гистограмм распределения серы в основных минералого-промышленных типах железистых кварцитов, сланцах и богатых рудах Стойленского месторождения являются правосимметричными – значения асимметрии превышают единицу. На некоторых гистограммах (окисленные кварциты, богатые руды, сланцы, кварциты с содержанием Fe магн. > 26 %) четко обособлены пробы с повышенными содержаниями сульфидных минералов. Гистограммы с нормальным распределением серы характеризуются высокими коэффициентами вариации и несколько отличаются от гистограмм логнормального распределения более высокой симметрией относительно медианы.

Расчеты фоновых и аномальных содержаний серы в основных типах пород железисто-кремни-

сто-сланцевой формации Стойленского месторождения проводились по стандартной методике с учетом закона распределения этого элемента. Для каждой породной разновидности вычислены фоновые значения (среднее арифметическое и среднее геометрическое), первая, вторая и третья аномалии по правилу «трех сигм» для нормального распределения и по аналогичной методике с небольшими изменениями для логнормального (табл. 2).

Вычисление средних значений и порогов аномальности отдельно для каждого минералого-петрографического типа железистых кварцитов позволило выделить в выборках разнотипных железистых кварцитов породы с повышенными содержаниями серы для дальнейших более детальных исследований. В то же время для сравнения абсолютных содержаний серы в различных породах железисто-кремнисто-сланцевой формации (кварциты, сланцы, богатые руды) были рассчитаны фоновые значения и пороги аномальности для всего массива опробованных пород Стойленского месторождения в целом.

Анализ средних значений серы в основных видах и разновидностях пород Стойленского карьера (табл. 2) позволяет установить закономерные изменения концентраций этого элемента: 1) богатые руды (0,317 %) → окисленные кварциты (0,051 %) → полуокисленные кварциты (0,035 %) → неокисленные кварциты (0,029 %). Такая закономерность во многом объясняется более широким распространением наложенной эпигенетической сульфидной минерализации в зоне окисления железистых кварцитов. Сланцы (0,322 %), в свою очередь, являются одними из наиболее сульфидизированных типов пород коробковской свиты, что согласуется с благоприятными для образования сульфидов палеоклиматическими и палеофациальными обстановками формирования сланцевых подсвит; 2) в массиве неокисленных железистых кварцитов средние содержания серы закономерно снижаются от наиболее мелководных к более глубоководным литолого-фациальным разновидностям железисто-кремнисто-сланцевой формации: слабородные (0,484 %) → силикатно-магнетитовые (0,134 %) → магнетитовые (0,027 %) → магнетитовые с гематитом (0,018 %) → гематит-магнетитовые (0,012 %) кварциты.

Расчет корреляционных зависимостей серы проводился по стандартной методике с последующим сравнением полученных коэффициентов (табл. 3) с критическими значениями коэффициентов корреляции, зависящими от объема выборки.

Таблица 1  
Расчет основных параметров для определения законов распределения серы в основных промышленных типах железистых кварцитов сланцев и богатых рудах Стойленского месторождения

|                             | Сланцы |              | Неокисленные разности железистых кварцитов |              |                          | Богатые руды         |              |                     | Окисленные кварциты      |      | Полу-окисленные кварциты |      |      |       |
|-----------------------------|--------|--------------|--|--------------|--------------------------|----------------------|--------------|---------------------|--------------------------|------|--------------------------|------|------|-------|
|                             | Сланцы | Слабо-рудные | Силикатно-магнетитовые                     | Магнетитовые | Магнетитовые с гематитом | Гематит-магнетитовые | Богатые руды | Окисленные кварциты | Полу-окисленные кварциты |      |                          |      |      |       |
| Кол-во проб                 | 27     | 6            | 17   | 82           | 34                       | 18                   | 12           | 18                  | 14                       |      |                          |      |      |       |
| ист.                        | Log 10 | ист.         | ист.                                       | ист.         | ист.                     | ист.                 | ист.         | ист.                | ист.                     |      |                          |      |      |       |
| Экцесс ( $t_4$ )            | 4,21   | 1,59         | 1,27                                       | 12,13        | 0,64                     | 23,25                | 1,43         | 8,45                | 0,73                     | 5,35 | 0,63                     | 5,51 | 0,82 | 2,80  |
| $\sqrt{24/n}$               | 0,94   | 4,00         | 1,19                                       | 0,54         | 0,54                     | 0,84                 | 0,84         | 1,16                | 1,16                     | 1,41 | 1,41                     | 1,16 | 1,16 | 1,31  |
| Критерий нормальности $t_2$ | 4,47   | 0,79         | 1,07                                       | 22,42        | 1,19                     | 27,67                | 1,70         | 7,31                | 0,63                     | 3,79 | 0,44                     | 4,77 | 0,71 | 2,13  |
| Асимметрия ( $t_3$ )        | 2,23   | 1,21         | 1,23                                       | 3,42         | 0,72                     | 4,57                 | 0,82         | 2,79                | 1,01                     | 2,41 | 0,06                     | 2,57 | 1,22 | 1,48  |
| $\sqrt{6/n}$                | 0,22   | 1,00         | 0,59                                       | 0,27         | 0,27                     | 0,42                 | 0,42         | 0,58                | 0,58                     | 0,71 | 0,71                     | 0,58 | 0,58 | 0,66  |
| Критерий нормальности $t_1$ | 4,74   | 1,21         | 2,07                                       | 12,64        | 2,65                     | 10,89                | 1,95         | 4,84                | 1,75                     | 3,41 | 0,08                     | 4,45 | 2,10 | 2,26  |
| Закон распределения         | Лог.   | Норм.        | Норм.                                      | Лог.         | Лог.                     | Лог.                 | Лог.         | Лог.                | Лог.                     | Лог. | Лог.                     | Лог. | Лог. | Норм. |

Примечание. Лог. – логнормальный, Норм. – нормальный, ист. – численное значение, Log 10 – десятичный логарифм.

Таблица 2  
Расчет основных переменных для определения фоновых и аномальных значений серы в различных промышленных типах железистых кварцитов, сланцев и богатых рудах Стойленского месторождения (в %)

| Логнормальный [Нормальный] закон                        | Неокисленные кварциты |        | Сланцы       |                        | Неокисленные разности железистых кварцитов |                          |                      |              |                 |                     | Богатые руды |      | Окисл. кварциты |       | Полуокисл. кварциты |  |
|---|-----------------------|--------|--------------|------------------------|--|--------------------------|----------------------|--------------|-----------------|---------------------|--------------|------|-----------------|-------|---------------------|--|
|   | Неокисленные кварциты | Сланцы | Слабо-рудные | Силикатно-магнетитовые | Магнетитовые                               | Магнетитовые с гематитом | Гематит-магнетитовые | Богатые руды | Окисл. кварциты | Полуокисл. кварциты |              |      |                 |       |                     |  |
| С фоновое: среднее геометрическое (Сф) [арифметическое] | 0,029                 | 0,322  | [0,484]      | [0,134]                | 0,027                                      | 0,018                    | 0,012                | 0,317        | 0,051           | [0,035]             |              |      |                 |       |                     |  |
| Min значение  | 0,002                 | 0,013  | 0,037        | 0,010                  | 0,002                                      | 0,004                    | 0,003                | 0,010        | 0,013           | 0,009               |              |      |                 |       |                     |  |
| Max значение  | 3,5*                  | 5,410  | 1,261        | 0,449                  | 0,541                                      | 0,335                    | 0,107                | 8,280        | 0,870           | 0,090               |              |      |                 |       |                     |  |
| Стандартное отклонение ( $\delta$ )                     | –                     | –      | 0,440        | 0,122                  | –  | –                        | –                    | –            | –               | 0,021               |              |      |                 |       |                     |  |
| Стандартное отклонение (логарифмированное)              | 0,567                 | 0,706  | –            | –                      | 0,482                                      | 0,420                    | 0,396                | 0,794        | 0,551           | –                   |              |      |                 |       |                     |  |
| Стандартный множитель (E)                               | 3,690                 | 5,085  | –            | –                      | 3,032                                      | 2,631                    | 2,487                | 6,221        | 3,554           | –                   |              |      |                 |       |                     |  |
| Первая аномалия $C_1 > Cф * E [ > Cф + \delta ]$        | 0,107                 | 1,639  | [0,924]      | [0,256]                | 0,082                                      | 0,048                    | 0,030                | 1,970        | 0,182           | [0,056]             |              |      |                 |       |                     |  |
| Вторая аномалия $C_2 > Cф * E^2 [ > Cф + 2\delta ]$     | 0,394                 | 8,332  | [1,364]      | [0,378]                | 0,250                                      | 0,126                    | 0,074                | 12,258       | 0,645           | [0,077]             |              |      |                 |       |                     |  |
| Третья аномалия $C_3 > Cф * E^3 [ > Cф + 3\delta ]$     | 1,455                 | 42,371 | [1,804]      | [0,501]                | 0,757                                      | 0,331                    | 0,183                | 76,265       | 2,294           | [0,098]             |              |      |                 |       |                     |  |
| Закон распределения                                     | Лог.                  | Лог.   | Норм.        | Норм.                  | Лог.                                       | Лог.                     | Лог.                 | Лог.         | Лог.            | Лог.                | Лог.         | Лог. | Лог.            | Норм. | Норм.               |  |

Для получения дополнительной информации был введен показатель «Fe немагн.», равный разности содержаний общего и магнетитового железа. Значимые коэффициенты корреляции серы с общим и

магнитным железом установлены в сланцах, что объясняется повышенным содержанием в этих породах пирита и пирротина, что было выявлено на стадии полевых работ.

Таблица 3

Коэффициенты парной корреляции серы с основными показателями продуктивности

| Название породы<br>(количество проб) | Нижний предел<br>коэффициента  | Коэффициенты парной корреляции серы |             |            |                    |
|--------------------------------------|--------------------------------|-------------------------------------|-------------|------------|--------------------|
|                                      |                                | Fe общ.                             | Fe магн.    | Fe немагн. | Fe магн. / Fe общ. |
| Богатые руды (12)                    | $\pm 0,53$ ( $\alpha = 0,05$ ) | -0,23                               | -0,28       | -0,18      | -0,27              |
| Окисленные кварциты (18)             | $\pm 0,44$ ( $\alpha = 0,05$ ) | 0,23                                | -0,19       | 0,29       | -0,23              |
| Полуокисленные кварциты (14)         | $\pm 0,50$ ( $\alpha = 0,05$ ) | 0,05                                | 0,03        | 0,00       | 0,08               |
| Сланцы (27)                          | $\pm 0,37$ ( $\alpha = 0,05$ ) | <b>0,40</b>                         | <b>0,38</b> | 0,14       | 0,04               |
| Кварциты                             |                                |                                     |             |            |                    |
| Слаборудные (6)                      | $\pm 0,71$ ( $\alpha = 0,05$ ) | 0,31                                | 0,16        | 0,16       | 0,66               |
| Силикатно-магнетитовые (17)          | $\pm 0,46$ ( $\alpha = 0,05$ ) | 0,24                                | 0,13        | 0,23       | 0,12               |
| Магнетитовые (82)                    | $\pm 0,22$ ( $\alpha = 0,05$ ) | 0,17                                | 0,09        | 0,17       | -0,12              |
| Магнетитовые с гематитом (34)        | $\pm 0,33$ ( $\alpha = 0,05$ ) | -0,21                               | -0,17       | 0,00       | -0,05              |
| Гематит-магнетитовые (18)            | $\pm 0,44$ ( $\alpha = 0,05$ ) | -0,40                               | -0,23       | -0,19      | 0,09               |

#### Характеристика сульфидных минералов в породах железисто-кремнисто-сланцевой формации в пределах Стойленского месторождения

Одной из важнейших особенностей серонакопления в железистых кварцитах является ведущая роль в минеральном парагенезисе сульфидов и, прежде всего, пирита, пирротина и халькопирита. Анализ пространственно-временных соотношений пирита с рудными и силикатными минералами свидетельствует о наличии нескольких генераций пирита. При изучении сульфидной минерализации более подробно были выделены морфологические типы, каждый из которых в свою очередь имеет свою генетическую приуроченность [5–8].

Наибольшим распространением в породах характеризуется *пирит*. Самая ранняя и незначительная по степени распространенности генерация пирита представлена тонкой эмульсионной прослойной вкрапленностью размером 0,02–0,04 мм. Можно считать подобный пирит сингенетичным, образованным в условиях сероводородной обстановки бассейна близкоодновременно с основными рудными минералами: магнетитом и гематитом. Выделения пирита округлые, иногда (очень редко) образуют скопления (рис. 1, а).

Наиболее широким распространением, многообразием форм, вариациями размеров (от сотых долей до 1 мм) и более сложным характером взаимоотношений с другими рудными (прежде всего с

гематитом) и нерудными минералами отличается пирит второго морфогенетического типа, слагающий вкрапленные, мелкопятнистые, линзовидные, полосчатые обособления. Форма зерен, как правило, ксеноморфная (рис. 1, в). Развит преимущественно по магнетиту и гематиту. Важной особенностью пирита этой генерации, отражающей его связь с процессами регионального метаморфизма, является его тесная ассоциация с амфиболами и мелкозернистым кварцем ( $\pm$  карбонаты).

Выделяется пирит массивный (3 морфогенетического типа), слитой, развитый преимущественно в зонах контакта сланцев с перекрывающими безрудными и слаборудными кварцитами, преимущественно наложенная сульфидизация. Содержание такого пирита в породе достигает 70 %, встречается в катаклазитах и породах интенсивно сульфидизированных, получивших название лебединит.

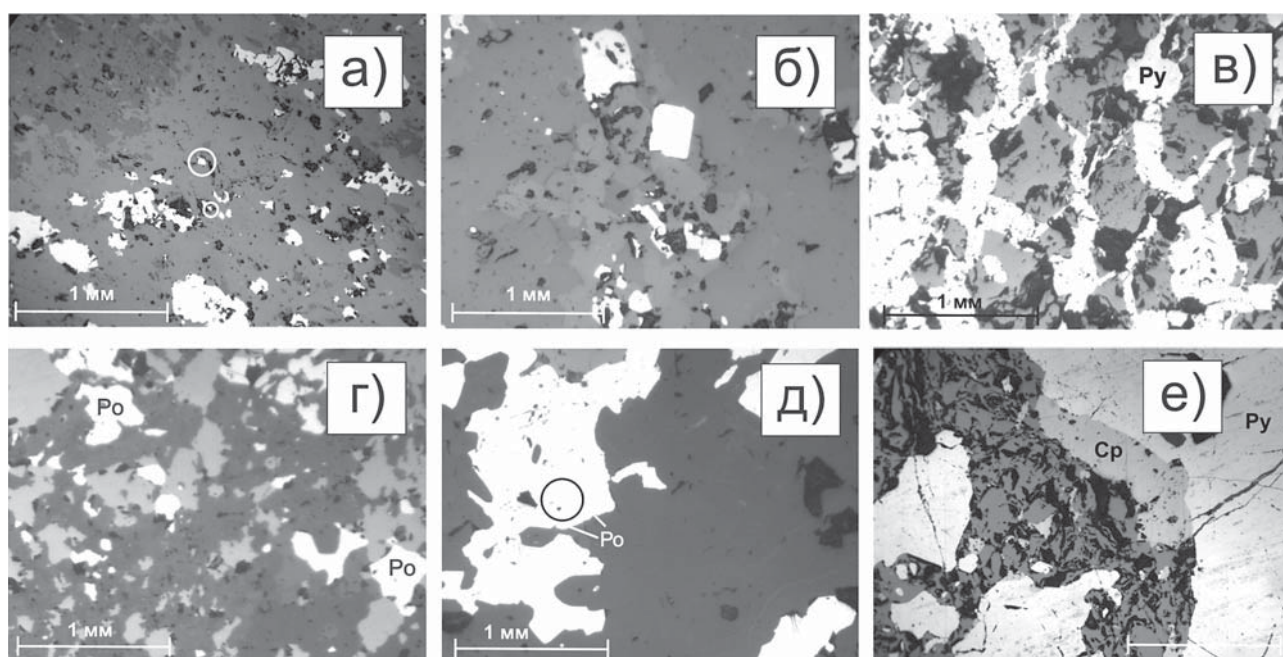
Пирит 4 морфогенетического типа, являющийся составной частью кварц-сульфидных и сульфидно-кварцевых ( $\pm$  карбонаты) прожилков, прожилковидных, в меньшей степени мелкопятнистых обособлений, обычно хорошо оформлен, как правило, некорродирован, образует крупные (до 3 мм) идиоморфные зерна в виде кристаллов кубической формы (рис. 1, б). Он имеет хорошую кристаллографическую огранку, чем отличается от более ранних ксеноморфных сульфидов, возникших в ходе процессов литогенеза и метаморфизма [8, 10]. Такой пирит развит преимущественно в трещинках или жилках.

Пирит наиболее поздний встречается среди окисленных руд в зоне гипергенеза.

Более ограниченно развитый *пирротин* в железистых кварцитах также представлен несколькими отчетливо выраженными морфотипами. Наиболее ранний и ограниченно распространенный присутствует в виде мельчайших дисперсных включений в магнетите. Такой пирротин является наименее распространенным (1 морфогенетический тип). Ксеноморфный пирротин представлен двумя типами, образуя отдельные зерна, а также сростки с магнетитом (рис. 1, з). Его количество составляет 2–7 % (2 морфогенетический тип). Пирротин

наиболее поздней генерации встречается значительно реже (до 1 %) в виде включений в пирите (3 морфогенетический тип; рис. 1, д).

Для *халькопирита* характерно наличие двух основных морфогенетических типов. Ранний и широко распространенный халькопирит с относительно крупными ксеноморфными зернами образует сростки с магнетитом, пиритом и пирротинном (рис. 1, е), его количества в железистых кварцитах достигают 7 % (1 морфогенетический тип). Более ограниченно развитый (до 1 %) халькопирит поздней генерации встречается в виде включений в пирите (2 морфогенетический тип).



**Рис. 1.** Морфогенетические типы сульфидных минералов: а – мелкий пирит, распределенный в нерудной массе (выделен белым контуром); б – кубический кристалл пирита; в) ксеноморфный пирит (Py) в интерстициях среди магнетита; г – ксеноморфный пирротин (Po) в сростках с магнетитом; д – пирротин (Po) в виде включений в пирите; е – ксеноморфный халькопирит (Cp), образующий сростки с пиритом (Py), и как включение в нем

Принадлежность сульфидных минералов к различным морфогенетическим типам достаточно отчетливо проявляется и в химическом составе (табл. 4).

В каждом из рассмотренных геолого-промышленных типов железистых кварцитов наблюдаются свои особенности распределения сульфидных минералов.

#### Слаборудные железистые кварциты

Кварциты этого типа характеризуются наибольшим развитием сульфидной минерализации. Преимущественным распределением отличаются пириты 1, 2 и 3 морфогенетических типов (ксеномор-

фные в нерудных прослоях, мелко распыленные и массивные слитые соответственно), реже отмечаются пириты изометричного облика (кубические 4 морфогенетического типа), халькопирит выделен в виде ксеноморфных зерен в сростках с магнетитом (1 морфогенетического типа), пирротин отмечается в виде включений в пирите (3 морфогенетического типа).

#### Силикатно-магнетитовые кварциты

В силикатно-магнетитовом промышленном типе преобладающее количество проб в том или ином количестве несут сульфидную минерализацию. Сульфиды представлены пиритами 2 морфо-

## Химические составы сульфидных минералов

| Типы кварцитов                                    | S                           | Fe                           | Co                        | Ni                       | Cu                         | As                       | Другие элементы           | Сумма                          |
|---|-----------------------------|------------------------------|---------------------------|--------------------------|----------------------------|--------------------------|---------------------------|--------------------------------|
| Пирит ксеноморфный                                |                             |                              |                           |                          |                            |                          |                           |                                |
| Слаборудные кварциты (n = 2)                      | <u>51,8–53,08</u><br>52,44  | <u>46,42–47,1</u><br>46,76   | <u>0,04–0,06</u><br>0,05  | 0                        | <u>0,29–0,39</u><br>0,34   | 0                        | <u>0,34–0,77</u><br>0,56  | <u>99,08–101,32</u><br>100,2   |
| Магнетитовые кварциты (n = 15)                    | <u>51,07–53,5</u><br>52,3   | <u>45,48–46,8</u><br>46,3    | <u>0,02–0,1</u><br>0,04   | <u>0–0,035</u><br>0,019  | <u>0–0,06</u><br>0,024     | <u>0,02–1,56</u><br>0,37 | <u>0,195–0,59</u><br>0,39 | <u>98,49–100,62</u><br>99,5    |
| Силикатно-магнетитовые кварциты (n = 14)          | <u>50,0–53,62</u><br>52,2   | <u>45,21–47,55</u><br>46,5   | <u>0,03–0,06</u><br>0,05  | <u>0–0,12</u><br>0,04    | <u>0–0,19</u><br>0,08      | <u>0–0,1</u><br>0,03     | <u>0,2–0,79</u><br>0,44   | <u>98,47–100,93</u><br>99,5    |
| Гематит-магнетитовые кварциты (n = 2)             | <u>51,97–52,74</u><br>52,35 | <u>46,74–47,31</u><br>47,03  | <u>0,01–0,03</u><br>0,02  | 0                        | <u>0,06–0,09</u><br>0,075  | 0                        | <u>0,35–0,42</u><br>0,39  | <u>99,96–100,11</u><br>100,04  |
| Межрудные сланцы (n = 29)                         | <u>52,71–52,86</u><br>52,79 | <u>45,72–46,77</u><br>46,245 | <u>0,02–0,11</u><br>0,065 | <u>0,03–0,17</u><br>0,1  | <u>0,03–0,08</u><br>0,041  | <u>0–0,16</u><br>0,08    | <u>0,02–0,14</u><br>0,08  | <u>98,53–100,29</u><br>99,41   |
| Пирит массивный                                   |                             |                              |                           |                          |                            |                          |                           |                                |
| Силикатно-магнетитовые кварциты (n = 2)           | <u>51,64–54,28</u><br>52,96 | <u>46,42–47,01</u><br>46,72  | 0,02                      | 0                        | <u>0,03–0,14</u><br>0,09   | <u>0–0,08</u><br>0,04    | <u>0,22–0,34</u><br>0,28  | <u>99,33–101,21</u><br>100,27  |
| Магнетитовые кварциты (n = 2)                     | <u>51,75–52,97</u><br>52,36 | <u>46,17–46,27</u><br>46,22  | <u>0,03–0,05</u><br>0,04  | <u>0,02–0,08</u><br>0,05 | <u>0,04–0,1</u><br>0,07    | 0                        | <u>0,67–1,01</u><br>0,84  | <u>99,26–100,28</u><br>99,77   |
| Межрудные сланцы (n = 25)                         | <u>52,78–53,11</u><br>52,95 | <u>45,72–46,11</u><br>45,92  | <u>0–0,05</u><br>0,04     | <u>0,02–0,08</u><br>0,08 | <u>0,02–0,14</u><br>0,12   | 0                        | <u>0,2–0,59</u><br>0,4    | <u>99,31–99,92</u><br>99,62    |
| Пирит из зоны окисления                           |                             |                              |                           |                          |                            |                          |                           |                                |
| Окисленные кварциты (n = 3)                       | <u>52,14–53,66</u><br>52,9  | <u>46,55–47,31</u><br>47     | <u>0–0,06</u><br>0,023    | <u>0–0,01</u><br>0,003   | <u>0–0,01</u><br>0,003     | <u>0–0,04</u><br>0,013   | <u>0,35–0,71</u><br>0,52  | <u>100,16–100,95</u><br>100,57 |
| Пирротин ксеноморфный                             |                             |                              |                           |                          |                            |                          |                           |                                |
| Магнетитовые кварциты (n = 4)                     | <u>39,4–39,63</u><br>39,5   | <u>58,65–59,36</u><br>58,87  | <u>0,05–0,06</u><br>0,055 | <u>0–0,01</u><br>0,008   | <u>0–0,19</u><br>0,1       | <u>0–0,14</u><br>0,04    | <u>0,26–1,2</u><br>0,72   | <u>98,82–99,71</u><br>99,4     |
| Силикатно-магнетитовые кварциты (n = 2)           | <u>39,64–40,32</u><br>39,98 | <u>58,04–59,42</u><br>58,73  | 0,06                      | <u>0,05–0,58</u><br>0,32 | 0                          | <u>0,15–0,25</u><br>0,2  | <u>0,41–0,75</u><br>0,58  | <u>99,99–100,1</u><br>100      |
| Межрудные сланцы (n = 16)                         | <u>37,73–39,86</u><br>39,1  | <u>57,86–60,66</u><br>59,01  | <u>0,02–0,17</u><br>0,07  | <u>0,02–0,38</u><br>0,26 | <u>0,04–0,51</u><br>0,16   | <u>0,1–0,23</u><br>0,15  | <u>0,02–0,53</u><br>0,17  | <u>98,11–99,88</u><br>99,18    |
| Пирротин в виде включений в пирите                |                             |                              |                           |                          |                            |                          |                           |                                |
| Магнетитовые кварциты (n = 1)                     | 39,15                       | 59,69                        | 0,04                      | 0                        | 0,01                       | 0                        | 0,57                      | 99,56                          |
| Силикатно-магнетитовые кварциты (n = 2)           | <u>39,89–40,24</u><br>40,0  | <u>58,78–59,25</u><br>59,0   | 0,01                      | <u>0–0,06</u><br>0,03    | <u>0,02–0,07</u><br>0,05   | <u>0–0,17</u><br>0,085   | <u>0,4–0,47</u><br>0,44   | <u>99,44–100,3</u><br>99,87    |
| Халькопирит ксеноморфный                          |                             |                              |                           |                          |                            |                          |                           |                                |
|   | S                           | Fe                           | Sb                        | Ag                       | Cu                         | As                       | Другие элементы           | Сумма                          |
| Магнетитовые кварциты (n = 7)                     | <u>33,7–35,0</u><br>34,4    | <u>28,0–31,2</u><br>29,7     | <u>0–0,6</u><br>0,17      | <u>0–0,26</u><br>0,19    | <u>33,63–36,2</u><br>34,87 | <u>0–0,27</u><br>0,1     | <u>0,3–0,59</u><br>0,42   | <u>98,78–100,2</u><br>99,7     |
| Силикатно-магнетитовые кварциты (n = 2)           | <u>34,8–34,9</u><br>34,9    | <u>30,2–30,3</u><br>30,26    | 0                         | <u>0–0,15</u><br>0,08    | <u>34,14–34,8</u><br>34,49 | <u>0,13–0,3</u><br>0,2   | <u>0,23–0,3</u><br>0,29   | <u>99,62–100,7</u><br>100,2    |
| Халькопирит в виде включений и сростков с пиритом |                             |                              |                           |                          |                            |                          |                           |                                |
| Слаборудные кварциты (n = 2)                      | <u>34,1–35,3</u><br>34,7    | <u>28,2–29,2</u><br>28,7     | 0                         | <u>0–0,01</u><br>0,005   | <u>35,37–35,4</u><br>35,4  | <u>0–0,13</u><br>0,07    | <u>0,4–0,43</u><br>0,42   | <u>98,09–100,5</u><br>99,28    |
| Магнетитовые кварциты (n = 2)                     | <u>33,9–34,2</u><br>34,04   | <u>29,2–32,5</u><br>30,85    | <u>0–0,4</u><br>0,2       | <u>0,01–0,08</u><br>0,05 | <u>32,95–34,9</u><br>33,9  | 0                        | <u>0,24–0,3</u><br>0,28   | <u>99,08–99,64</u><br>99,36    |
| Силикатно-магнетитовые кварциты (n = 4)           | <u>32,6–33,7</u><br>33,43   | <u>28,6–31,2</u><br>30,2     | <u>0–0,3</u><br>0,18      | <u>0–0,2</u><br>0,12     | <u>32,61–36,1</u><br>34,16 | <u>0–0,19</u><br>0,08    | <u>0,1–0,37</u><br>0,25   | <u>94,3–101,02</u><br>98,42    |

*Примечание.* Анализы выполнены на микрозонде Camebax-100, аналитик Л.Н. Кононкова (ГЕОХИ РАН). В числителе указаны пределы колебаний содержания элемента, в знаменателе – средние значения. Ошибка измерения (сигма) для содержаний компонента более 10 % вес. составляет 2 % отн.; для 5–10 % вес. – 5 % отн.; для 1–5 % вес. – 10 % отн.; для 0,1–1 % вес. – 20 % отн.; для 0,1–0,01 % вес. – 50 % отн.

генетического типа, реже встречается мелко распыленный 1 морфогенетического типа, отмечаются пирротин (3 морфогенетического типа) и ксеноморфный халькопирит в сростках с магнетитом и в виде отдельных зерен. Среди сульфидных минералов наибольшим распространением отличается мелко распыленный пирит.

#### Магнетитовые кварциты

Сульфиды представлены в основном пиритом ксеноморфным как в нерудных прослоях, так и в рудных интерстициях (пирит 2 морфогенетического типа), встречается хорошо оформленный, изометричный пирит 4 морфогенетического типа, реже мелкий распределенный в породе (1 морфогенетического типа) и слитой массивный (3 морфогенетического типа). Пирротин выделяется также в виде ксеноморфных зерен, иногда в сростаниях с магнетитом (2, 3 морфогенетические типы). В сростках с магнетитом также обнаружен халькопирит (1 морфогенетического типа). Эпигенетические прожилки (1–2 мм) сульфидов (пирит, пирротин) редки.

#### Гематит-магнетитовые кварциты

Для магнетитовых с гематитом кварцитов сульфидизация не характерна. Среди содержащихся в малом процентном отношении сульфидов наблюдаются пириты от ксеноморфных до хорошо оформленных, реже массивные, а также ксеноморфный пирротин и халькопирит в сростках с магнетитом.

Вскрытые в карьере месторождения толщи *межрудных сланцев* нижней сланцевой подсвиты  $kg^2$  также характеризуются широким развитием довольно разнообразной (как по видовому составу, так и по концентрации в породе) сульфидной минерализации. Среди сульфидов количественно преобладают пирит и пирротин нескольких морфотипов, в целом аналогичных описанным выше для железистых кварцитов. Другие сульфидные минералы, такие как халькопирит, марказит, арсенопирит, представлены в значительно меньших количествах, чем пирит и пирротин. Сами сланцевые толщи характеризуются несколько увеличенным (по сравнению с железистыми кварцитами) развитием сульфидной минерализации, хотя в целом содержание сульфидных минералов незначительно и редко превышает 1–3 %.

Непосредственно на контакте с малорудными и безрудными кварцитами залегают интенсивно сульфидизированные амфибол-кварц-слюдистые сланцы, часто брекчированные, с наложенной кар-

бонатизацией и окварцеванием, мощность их достигает 1–2 м. Среди рудных минералов преобладает пиритовая минерализация с мелкими включениями пирротина, халькопирита, арсенопирита, галенита и сфалерита. Здесь же, на контакте между подстилающими сланцами и железистыми кварцитами верхней железорудной подсвиты, залегают своеобразные карбонатно-сульфидные руды. Отдельные их прослои могут распространяться в приконтактовую зону и сланцев, и кварцитов. Они представляют собой по сути дела массивные сульфидные руды, сложенные пиритом, с единичными вкраплениями пирротина, халькопирита, арсенопирита. Исследованиями последних лет в составе таких руд установлен широкий спектр сульфидов, теллуридов и висмутидов различных металлов, в том числе золота и серебра [11], и высказано предположение об эпигенетической природе этих руд. Мощность таких прослоев колеблется от первых десятков сантиметров до первых метров и более.

В целях изучения характера распределения сульфидов в зоне развития гипергенных процессов проводились исследования горизонтов окисленных железных руд. Окисленные железные руды на Стойленском месторождении представляют собой остаточные и переотложенные продукты древней площадной коры выветривания по железистым кварцитам. В профиле коры выветривания железистых кварцитов Стойленского месторождения по степени изменения выделяются следующие разновидности пород: полуокисленные железистые кварциты; окисленные железистые кварциты; остаточные богатые железные руды.

В *полуокисленных железистых кварцитах* процессы изменения пород проявляются слабо. Отмечается развитие карбонатов. Сульфиды представлены ксеноморфными единичными зёрнами пирита, закономерно распределенными по породе. Появление аллотигенных карбонатов и пирита обусловлено, по всей вероятности, влиянием общей карбонатизации коры выветривания железных руд, происходившей в эпоху доверхневизейского корообразования [1].

В минеральном составе *окисленных железистых кварцитов* изменения носят более существенный характер. Сульфиды, часто встречающиеся совместно с карбонатами (представленными сидеритом), образуют более крупные обособления (от десятых долей до первых миллиметров) либо заполняют межзерновое пространство в матрице пород в зонах трещиноватости и брекчи-

рования. В целом, однако, содержание сульфидов остается крайне низким, редко достигая первых процентов, некоторые образцы вообще не содержат сульфидов.

*Остаточные богатые руды*, образующиеся при выветривании железистых кварцитов, как правило, полосчатые, мелко- и тонкозернистые. Из сульфидных минералов в богатых рудах наиболее распространен пирит (содержание его в породах достигает 3 %), который встречается как в виде отдельных, хорошо образованных кристаллов, так и в сростаниях с гематитом, пирротин распространен незначительно, встречается в виде единичных зерен.

В целом, железные руды в зоне окисления характеризуются широким развитием наложенных инфильтрационных процессов – карбонатизации (сидеритизации), шамозитизации, пиритизации. Привнос серы связан с восстановительным (субаквальным) этапом корообразования, с последующим отложением ее в виде сульфидных минералов [1].

Переотложенные (осадочные) руды обычно имеют девонский возраст и развиты в пониженных участках докембрийского рельефа на остаточных рудах, имеют небольшое распространение. Представлены рудными и слабрудными брекчиями. Эти породы характеризуются значительным развитием сульфидной минерализации (до 10–20 %). Сульфиды представлены пиритом и реже марказитом, образующими дендритовидные, натечные образования, заполняющие трещины и пустоты в породе. Пирит обычно в виде кавернозных зерен, а также микрозернистых кристаллов, распыленных в породе.

### Выводы

В процессе накопления серы в породах железисто-кремнисто-сланцевой формации установлена ведущая роль литологического фактора. Максимальные средние содержания серы приурочены к сланцам и слабрудным кварцитам (0,322 % и 0,484 % соответственно) – наиболее мелководным образованиям литолого-фациального профиля, где создавались наиболее благоприятные условия (рН, Eh, и др.) для образования сульфидных минералов.

С эпигенетическими процессами перераспределения серы связано образование сульфидных минералов поздних генераций, которые отличаются пониженными относительно сульфидов ранних генераций содержаниями Ni, Co, Cu (в пиритах и

пирротинах) и повышенными – As, Sb, Ag (в халькопиритах).

В массиве окисленных железных руд сульфидизация носит наложенный характер и обусловлена поздними экзогенными процессами. Максимальные содержания серы характерны для переотложенных богатых руд (рудных брекчий) девонского возраста, залегающих близ контакта с рыхлыми породами вскрыши.

Полученные в ходе исследований выводы о минералогии и особенностях распределения серы в породах Стойленского железорудного месторождения позволяют более детально картировать зоны сульфидизации, с которыми связаны повышенные концентрации благородных металлов [9].

*Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ грант №11-05-12050-офи-м-2011; РФФИ грант №11-05-00316-а; Грант Президента РФ МК-98.2011.5; ФЦП «Научные и научно-педагогические кадры инновационной России», ГК № 16.740.11.0623. Авторы выражают признательность коллективу геологической службы ОАО «Стойленский ГОК» за всестороннее содействие при выполнении полевых и лабораторно-аналитических работ*

### ЛИТЕРАТУРА

1. Орлов В. П. Железные руды КМА / В. П. Орлов. – М. : Геоинформмарк, 2001. – 616 с.
2. Ефремова С. В. Петрохимические методы исследования горных пород : справочное пособие / С. В. Ефремова, К. Г. Стафеев. – М. : Недра, 1985. – 511 с.
3. Чинн Р. Ф. Статистические методы в геологии : пер. с англ. / Р. Ф. Чинн. – М. : Мир, 1986. – 189 с.
4. Шестаков Ю. Г. Математическая статистика : учебное пособие / Ю. Г. Шестаков. – Красноярск : Изд-во Красноярского ун-та, 1982. – 116 с.
5. Лодочников В. Н. Главнейшие породообразующие минералы / В. Н. Лодочников. – М. : Недра, 1973. – 247 с.
6. Резникова О. Г. Морфогенетические типы сульфидных минералов железистых кварцитов Стойленского месторождения (КМА) в связи с оценкой их золотоплатиноносности / О. Г. Резникова // Минерагеня докембрия : материалы Всероссийской конференции. – Петрозаводск, 2009. – С. 208–212.
7. Резникова О. Г. Особенности распределения сульфидной минерализации на Михайловском железорудном месторождении КМА / О. Г. Резникова, А. В. Чепрасов // Материалы VI Всероссийской научной конференции студентов, аспирантов и молодых специалистов Геологи XXI века. – Саратов, 2005. – С. 48–49.
8. Чернышов Н. М. Особенности распределения и формы концентрирования платиноидов и золота в железистых кварцитах Лебединского месторождения КМА



(Центральная Россия) / Н. М. Чернышов, Т. П. Коробкина // Вестн. Воронеж. гос. ун-та. Серия: Геология. – 2005, № 1. – С. 140–152.

9. Чернышов Н. М. Платиноносные формации Курско-Воронежского региона (Центральная Россия) / Н. М. Чернышов. – Воронеж : Изд-во Воронеж. гос. ун-та, 2004. – 448 с.

10. Кашин С. В. Стадийность и зональность эпигенетических минералообразований в железистых квар-

цитах Михайловского месторождения (КМА) / С. В. Кашин, Е. В. Плющев, Н. В. Попкова // ЗВМО. – 2001. – № 6. – С. 95–98.

11. Чернышов Н. М. Сульфидная минерализация, содержащая благородные металлы, в межрудных сланцах Стойленского железорудного месторождения / Н. М. Чернышов, В. С. Кузнецов // Известия высших учебных заведений. Серия: Геология и разведка. – 2011. – № 2. – С. 17–23.

*Воронежский государственный университет*  
*В. В. Абрамов, доцент кафедры минералогии и петрологии*  
*Тел. 8 (473) 220-79-66*  
*avova82@mail.ru*

*В. С. Кузнецов, преподаватель кафедры минералогии и петрологии*  
*Тел. 8 (473) 220-79-66*  
*voronezhpodkl@inbox.ru*

*О. Г. Резникова, доцент кафедры минералогии и петрологии*  
*Тел. 8 (473) 220-87-79*  
*reznikova\_o@bk.ru*

*Voronezh State University*  
*V. V. Abramov, Assistant professor of Chair of Mineralogy and Petrology*  
*Tel. 8 (473) 220-79-66*  
*avova82@mail.ru*

*V. S. Kuznetsov, Assistant of Chair of Mineralogy and Petrology*  
*Tel. 8 (473) 220-79-66*  
*voronezhpodkl@inbox.ru*

*O. G. Reznikova, Assistant professor of Chair of Mineralogy and Petrology*  
*Tel. 8 (473) 220-87-79*  
*reznikova\_o@bk.ru*