

## ОЦЕНКА ТЕНДЕНЦИЙ ИЗМЕНЕНИЯ КАЧЕСТВА ЖЕЛЕЗНОЙ РУДЫ С РОСТОМ ГЛУБИНЫ ОТРАБОТКИ МЕСТОРОЖДЕНИЙ КАЧКАНАРСКОЙ ГРУППЫ

*В.Д. Кантемиров, Р.С. Титов, А.М. Яковлев,  
Институт горного дела УрО РАН, г. Екатеринбург, Россия*

**Аннотация:** В статье приведены результаты оценки тенденций изменения качества железной руды с ростом глубины отработки Гусевогорского и Собственно-Качканарского месторождений титаномагнетитов, выполненной на основе комплексных химико-минералогических исследований руд, добываемых с глубоких горизонтов карьеров, отрабатывающих месторождения. Установлены структуры основных рудообразующих минералов титаномагнетитовой руды и их химический состав. Определено, что железо в силикатных рудообразующих минералах присутствует в виде изоморфной примесей, содержание которых может превышать 15 %. Представлен минеральный состав магнитных фракций руд разной категории обогатимости (легкообогатимой, нормальнообогатимой и труднообогатимой) и классов крупности  $-0,5 + 0,16$  мм и  $-0,16 + 0,05$  мм. По данным комплексных химико-минералогических исследований руд Гусевогорского и Собственно-Качканарского месторождений построены графики и регрессионные модели изменения содержания железа общего ( $Fe_{общ}$ ) от глубины отработки эксплуатируемых карьеров. Проведена оценка влияния изменения содержания железа ( $Fe_{mag}$ ) и ( $Fe_{общ}$ ) с глубиной отработки карьеров месторождения на фазовый состав и качество рудной шихты, подаваемой на обогащение. Установлена тенденция по ухудшению содержания железа  $Fe_{mag}$  и  $Fe_{общ}$  с понижением глубины отработки Гусевогорского месторождения по всем карьерам. Разработаны рекомендации по формированию фазового состава руды из разных карьеров для поддержания в консолидированной рудной шихте оптимальных соотношений содержания железа  $Fe_{mag}$  и  $Fe_{общ}$ .

**Ключевые слова:** титаномагнетитовая руда, рудообразующие минералы, минеральный состав, содержание, магнитная сепарация, качество руды, глубина отработки карьера, рудная шихта.

## ASSESSMENT OF TRENDS IN THE QUALITY OF IRON ORE WITH AN INCREASE IN THE DEPTH OF MINING DEPOSITS OF THE KACHKANAR GROUP

*V.D. Kantemirov, R.S. Titov, A.M. Yakovlev,  
Institute of Mining, Ural Branch of the Russian Academy of Sciences, Yekaterinburg, Russia*

**Abstract:** The article presents the results of an assessment of trends in the quality of iron ore with an increase in the depth of mining of Gusevogorsk and Kachkanar deposits of titanomagnetites, carried out on the basis of complex chemical and mineralogical studies of ores extracted from deep horizons of quarries mining deposits. The structures of the main ore-forming minerals of titanomagnetite ore and their chemical composition are established. It is determined that iron in silicate ore-forming minerals is present in the form of isomorphous impurities, the content of which may exceed 15%. The mineral composition of magnetic fractions of ores of different categories of enrichment (easily enriched, normally enriched and difficult to enrich) and classes of size  $-0,5 + 0,16$  mm and  $-0,16 + 0,05$  mm is presented. According to the data of complex chemical and mineralogical studies of the ores of the Gusevogorsky and Kachkanar deposits, graphs and regression models of changes in the total iron content from the depth of mining of the exploited quarries are constructed. The influence of changes in the contents of magnetite iron and general with the depth of mining of the quarries of the deposit on the phase composition and quality of the ore charge supplied for enrichment was assessed. A tendency has been established to worsen the contents of magnetite and general iron with a decrease in the depth of mining of the Gusevogorsky deposit in all quarries. Recommendations have been developed for the formation of the phase composition of ore from different quarries to maintain optimal ratios of magnetite and total iron contents in the consolidated ore charge.

**Keywords:** titanomagnetite ore, ore-forming minerals, mineral composition, content, magnetic separation, ore quality, quarry mining depth, ore charge.

Гусевогорское и Собственно-Качканарское месторождения приурочены к Качканарскому габбро-пироксенитовому интрузивному массиву. Месторождения преимущественно сложены пироксенитами и относятся к эндогенной серии комплексных титаномагнетитовых промышленных месторождений [1, 2]. Руды месторождений включают силикатные первичные, вторичные и рудные минералы. Основная часть рудлагается силикатными минералами. Наиболее богатые по содержанию рудных минералов являются диаллаговые пироксениты, имеющие преобладающее значение [2-4].

Главным рудным минералом месторождений является титаномагнетит – более 90% всего объема рудной части месторождений. С титаномагнетитом связано около 70-75% железа и – 80% ванадия, остальная часть с силикатными минералами [2-4]. Железо в рудах месторождений выделяется в 3-х основных формах: связанное с титаномагнетитом (рудное железо); связанное с нерудными минералами (силикатное железо) и связанное с ильменитом (ильменитовое железо), редко с сульфидами [2, 5-8].

Руды месторождений относятся к вкрапленным малотитанистым ванадийсодержащим титаномагнетитовым рудам с очень низким содержанием вредных примесей (серы S – 0,03% и фосфора P – 0,02%). Содержание рудного железа в подавляющей массе руд месторождений составляет от 7 до 26-30%, содержания силикатного железа от 3,6 до 7-10%. Железо, кроме плагиоклаза, входит в состав практически всех минералов слагающих месторождения [2, 5-8].

В настоящее время месторождения эксплуатируются АО «ЕВРАЗ КГОК» 4-мя карьерами Гусевогорского месторождения (Северным, Главным, Западным и карьером Южной залежи) и одноименным карьером – Собственно-Качканарское месторождение (СКМ). Общий объем добычи превышает 60 млн т руды в год. Товарная руда, подаваемая на обо-

гащение представлена пироксенит-титаномагнетитовыми образованиями со средним содержанием  $Fe_{общ}$  – 15-17%,  $TiO_2$  – 1,22% и  $V_2O_5$  – 0,12%.

По обогатимости руды месторождения разделены на 4 технологических типа: легко- и нормальнообогатимые, трудно- и весьма труднообогатимые руды [9, 10].

Руды перерабатываются на ванадийсодержащий титаномагнетитовый концентрат. Технологической схемой обогащения руд месторождений предусмотрено производство концентратов фракции -0,071 мм с содержанием железа до 62,7 % для изготовления агломерата и окатышей [9-11].

**Цель исследований:** установление влияния глубины добычи руд на качество подаваемой из карьеров рудной шихты на обогащение и ее фазовый состав.

#### Методы и материалы исследований

Для исследований было отобрано 21 пробы на рабочих горизонтах 4-х карьеров, разрабатывающих рудные залежи Гусевогорского месторождения: Западном, Северном, Главном и Южной залежи, а также карьере Собственно-Качканарского месторождения (СКМ). На Северном карьере отдельно отобраны пробы в пределах северного (север) и южного (юг) участков карьера.

Отобранные пробы были исследованы на химико-минералогический состав и магнитные свойства. Минеральный состав проб следующий: клинопироксен – от 60 до 80%; магнетит – от 10 до 20%; амфибол – от 2 до 25%; хлорит – 2-5%; ильменит – 1-2% и менее; шпинель – 1-2 и менее %, оливин – от 2 до 10% и эпидот – 2-3%.

В табл. 1 представлены химический состав и структуры соединений исследуемых рудообразующих минералов Гусевогорского и Собственно-Качканарского месторождений.

Средние содержания химических элементов в зернах рудообразующих минералов Гусевогорского и Собственно-Качканарского месторождений представлены в табл. 2.

Таблица 1 / Table 1

**Химический состав и структуры соединений исследуемых рудообразующих минералов Гусевогорского и Собственно-Качканарского месторождений / Formulas of chemical compositions and structure of compounds of the studied ore-forming minerals of the Gusevogorsky and Kachkanarsky deposits proper.**

| Минерал / Mineral                                                                                               | Теоретическая формула / Theoretical formula                | Установленная формула в рудах месторождений / The established formula in the ores of the deposit                             |
|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------|------------------------------------------------------------|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| <b>Химические модели рудных минералов / Chemical models of ore minerals</b>                                     |                                                            |                                                                                                                              |
| Магнетит / Magnetite                                                                                            | $FeO \times Fe_2O_3$                                       | $(Fe^{2+}_{0,99}Mg_{0,01})_{\Sigma 1,0}O(Fe^{3+}_{1,97}Ti_{0,01}Al_{0,01}V_{0,02})_{\Sigma 2,01}O_3$                         |
| Ильменит / Ilmenite                                                                                             | $FeTiO_3$                                                  | $(Fe^{2+}_{0,93}Mn_{0,06}Mg_{0,01})_{\Sigma 1,0}(Ti_{0,96}Fe^{3+}_{0,03})_{\Sigma 0,99}O_3$                                  |
| <b>Химические модели рудообразующих силикатных минералов / Chemical models of ore-forming silicate minerals</b> |                                                            |                                                                                                                              |
| Шпинель / Spinel                                                                                                | $MgAl_2O_3$                                                | $(Mg_{0,7}Fe^{2+}_{0,28}Zn_{0,01})_{\Sigma 0,99}(Al_{1,89}Fe^{3+}_{0,1})_{\Sigma 1,99}O_4$                                   |
| Диопсид / Diopside                                                                                              | $CaMgSi_2O_6$                                              | $(Ca_{0,98}Na_{0,01})_{\Sigma 0,99}(Mg_{0,76}Fe_{0,18}Ti_{0,02}Al_{0,05})_{\Sigma 1,01}(Si_{1,79}Al_{0,21})_{\Sigma 2,0}O_6$ |
| Роговая обманка / Hornblende                                                                                    | $Ca_2(Mg, Fe, Al)_5 \times (Al, Si)_8O_{22}(OH)_2$         | $Ca_{2,05}Na_{0,58}K_{0,16}(Mg_{3,15}Fe_{1,23}Al_{0,55}Ti_{0,17}Mn_{0,01})_{\Sigma 5,11}(Si_{6,01}Al_{1,99})O_{22}(OH)_2$    |
| Оливин / Olivine                                                                                                | $(Mg, Fe)_2[SiO_4]$                                        | $(Mg_{1,67}Fe_{0,32}Mn_{0,01})_{\Sigma 2,0}(Si_{1,0}O_4)$                                                                    |
| Хлорит / Chlorite                                                                                               | $(Mg, Fe)_3(Si, Al)_4O_{10} \times (OH)_2(Mg, Fe)_3(OH)_6$ | $(Mg_{4,37}Fe_{0,39}Al_{1,22}Ti_{0,01})_{\Sigma 5,99}(Si_{2,77}Al_{1,23})_{\Sigma 4,0}O_{10}(OH)_8$                          |

Таблица 2 / Table 2

Среднее содержание основных элементов в зернах рудообразующих минералов Гусевогорского и Собственно-Качканарского месторождений / The average content of the main elements in the grains of ore-forming minerals of the Gusevogorsky and Kachkanarsky deposits proper.

| Минералы / Minerals           | Содержание элементов, % / The content of the elements |                  |                                |       |       |                  |      |                   |                               | Сумма / Total | Fe <sub>общ</sub> |
|-------------------------------|-------------------------------------------------------|------------------|--------------------------------|-------|-------|------------------|------|-------------------|-------------------------------|---------------|-------------------|
|                               | FeO                                                   | TiO <sub>2</sub> | Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> | MgO   | CaO   | SiO <sub>2</sub> | MnO  | Na <sub>2</sub> O | V <sub>2</sub> O <sub>5</sub> |               |                   |
| Магнетит / Magnetite          | 91,31                                                 | 2,64             | 1,85                           | 1,63  | -     | -                | 0,30 | -                 | 0,72                          | 98,45         | 70,78             |
| Оливин / Olivine              | 15,79                                                 | -                | -                              | 43,88 | -     | 39,88            | 0,33 | -                 | -                             | 99,87         | 12,28             |
| Амфибол / Amphibole           | 9,34                                                  | 0,95             | 12,81                          | 15,89 | 12,55 | 45,94            | 0,13 | 1,60              | -                             | 99,60         | 7,26              |
| Клинопироксен / Clinopyroxene | 5,50                                                  | 0,53             | 4,71                           | 15,19 | 23,25 | 50,86            | 0,16 | 0,27              | -                             | 100,0         | 4,28              |

Представленные в пробах минералы по своим магнитным свойствам и удельной магнитной восприимчивости ( $\chi_y$ , м<sup>3</sup>/кг) подразделяются на магнитные ( $\chi_y > (1,5-4) \cdot 10^{-4}$  м<sup>3</sup>/кг), электромагнитные ( $\chi_y$  от  $(0,5-3) \cdot 10^{-7}$  до  $(1,6-96) \cdot 10^{-7}$  м<sup>3</sup>/кг) и немагнитные ( $\chi_y < (0,2-2,4) \cdot 10^{-7}$  м<sup>3</sup>/кг) [12-14]. К минералам обладающими магнитными свойствами относится магнетит, к электромагнитным — ильменит, оливин, клинопироксен, амфибол и хлорид, к немагнитным — шпинель и эпидот.

Минералогическими исследованиями установлено, что железо в присутствующих силикатных минералах всех проб, электромагнитной и немагнитной фракций, в основном, присутствует в виде изоморфной примеси элемента (табл. 1), а также в незначительных количествах в виде механических микровключений магнетита (не более 1-3 %) в этих минералах.

Результаты химического и минералогического анализа содержания в пробах Fe<sub>общ</sub> и Fe<sub>маг</sub> и значения отношения Fe<sub>маг</sub>/Fe<sub>общ</sub> представлены в табл. 3, 4.

Для руд Качканарского типа установлено, что процесс обогащения с минимальными потерями железа в хвосты обеспечивается при отношении Fe<sub>маг</sub>/Fe<sub>общ</sub> на уровне 0,64.

Таблица 3 / Table 3

Содержание железа общего в исследуемых исходных пробах / The total iron content in the initial samples studied.

| № пробы / Sample no.                                                                             | Горизонт, м / Horizon, m | Карьер / Pit                     | Содержание, % / Content            |                    |                   |
|--------------------------------------------------------------------------------------------------|--------------------------|----------------------------------|------------------------------------|--------------------|-------------------|
|                                                                                                  |                          |                                  | Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub> общ | FeO <sub>общ</sub> | Fe <sub>общ</sub> |
| 2                                                                                                | +55                      | Западный / Western               | 34,12                              | 30,70              | 23,86             |
| 4                                                                                                | +85                      |                                  | 20,45                              | 18,40              | 14,31             |
| 5                                                                                                | +85                      | Северный (юг) / North (south)    | 25,43                              | 22,88              | 17,79             |
| 8                                                                                                | +130                     |                                  | 17,93                              | 16,13              | 12,54             |
| 9                                                                                                | -20                      | Главный / Main                   | 21,37                              | 19,23              | 14,94             |
| 12                                                                                               | +355                     |                                  | 15,64                              | 14,08              | 10,94             |
| 13                                                                                               | +85                      | Северный (север) / North (north) | 20,01                              | 18,01              | 14,00             |
| 16                                                                                               | +130                     |                                  | 15,68                              | 14,11              | 10,97             |
| 25                                                                                               | +130                     | Южн. залежь / Southern deposit   | 21,99                              | 19,79              | 15,38             |
| Среднее по пробам Гусевогорского месторождения / Average for samples of the Gusevogorskoye field |                          |                                  | 21,40                              | 19,26              | 14,97             |
| 22                                                                                               | +595                     | СКМ / SCM                        | 23,54                              | 21,18              | 16,46             |

Таблица 4 / Table 4

Значения отношения Fe<sub>маг</sub>/Fe<sub>общ</sub> руды исследуемых проб / Values of the Fe<sub>маг</sub>/Fe<sub>общ</sub> ratio of the ore of the studied samples.

| № пробы / Sample no. | Горизонт, м / Horizon, m | Карьер / Pit                     | Fe <sub>маг</sub> /Fe <sub>общ</sub> / Fe <sub>маг</sub> /Fe <sub>общ</sub> |
|----------------------|--------------------------|----------------------------------|-----------------------------------------------------------------------------|
| 2                    | +55                      | Западный / Western               | 0,82                                                                        |
| 4                    | +85                      |                                  | 0,55                                                                        |
| 5                    | +85                      | Северный (юг) / North (south)    | 0,74                                                                        |
| 8                    | +130                     |                                  | 0,70                                                                        |
| 9                    | -20                      | Главный / Main                   | 0,71                                                                        |
| 12                   | +355                     |                                  | 0,64                                                                        |
| 13                   | +85                      | Северный (север) / North (north) | 0,74                                                                        |
| 16                   | +130                     |                                  | 0,51                                                                        |
| 25                   | +130                     | Южн. залежь / Southern deposit   | 0,75                                                                        |
| 22                   | +595                     | СКМ / SCM                        | 0,67                                                                        |

После предварительной пробоподготовки рудного материала (рис. 1) была произведена его сухая магнитная сепарация на двухстадийном магнитном сепараторе валкового типа СМС-20М с напряженностью магнитного поля не менее 19000 Э (1,9 Тл).

Материал пробы разделялся на три продукта: ферромагнитный (магнитный); парамагнитный (электромагнитный) и немагнитный.

Полученные продукты сепарации, после их дополнительной механической подготовки, использовались для химико-минералогического исследования магнитной и электромагнитной фракций на содержания в них магнетита и железа. Химический и минералогический состав исходных исследуемых проб и продуктов их сепарации определялись рентгенофлуоресцентным, рентгеноструктурным и микронзондовыми методами анализа.

Изучение химического состава рудообразующих минералов (магнетита, клинопироксена, амфибола и др.) было проведено на сканирующем электронном микроскопе Jeol JSM-6390LV с энергодисперсионной приставкой INCA Energy 450 X-Max 80.

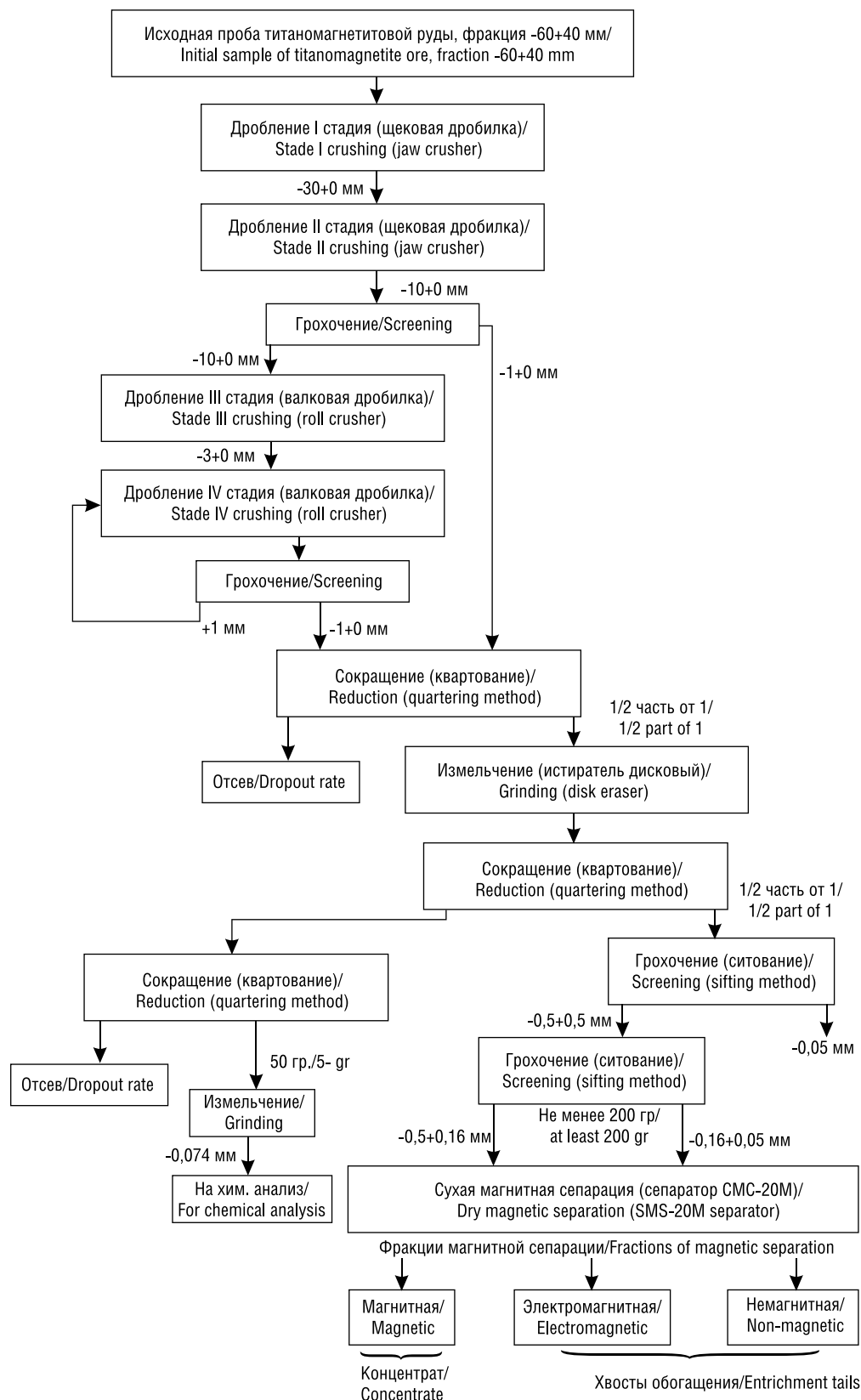


Рис. 1. Схема пробоподготовки рудных проб для магнитной сепарации / Fig. 1. Sample preparation scheme of ore samples for magnetic separation.

Для определения химического (силикатного) состава магнитных фракций, полученных из 10 исходных проб отражающих динамику изменения оцениваемых качественных параметров по глубине их отбора, использован физико-химический метод с анализом спектра [15-19].

Исследуемые магнитные фракции получены методом сухой магнитной сепарации исходных проб для классов крупности -0,5+0,16 мм. Анализ материала производился на рентгенофлуоресцентном волнодисперсионном спектрометре S4 Pioneer фирмы Bruker, позволяющем анализи-

ровать как порошковые пробы, так и монолитные образцы [20–22].

По результатам анализа, наряду с содержанием силикатных составляющих, пересчетом, определены содержания  $\text{Fe}_2\text{O}_{3\text{общ}}$ ,  $\text{FeO}_{\text{общ}}$  и  $\text{Fe}_{\text{общ}}$  для магнитных фракций исследуемых проб (табл. 5).

Таблица 5 / Table 5

**Содержание железа общего в магнитных фракциях исследуемых проб (кл. крупности -0,5+0,16 мм) / The total iron content in the magnetic fractions of the samples studied (cl. size -0,5+0,16 mm).**

| № пробы / Sample no.                                          | Горизонт, м / Horizon, m | Карьер / Pit                     | Содержание, % / Content             |                           |                          |
|---------------------------------------------------------------|--------------------------|----------------------------------|-------------------------------------|---------------------------|--------------------------|
|                                                               |                          |                                  | $\text{Fe}_2\text{O}_{3\text{общ}}$ | $\text{FeO}_{\text{общ}}$ | $\text{Fe}_{\text{общ}}$ |
| 2                                                             | +55                      | Западный / Western               | 51,33                               | 46,19                     | 35,90                    |
| 4                                                             | +85                      |                                  | 69,63                               | 62,66                     | 48,70                    |
| 5                                                             | +85                      | Северный (юг) / North (south)    | 53,41                               | 48,06                     | 37,36                    |
| 8                                                             | +130                     |                                  | 63,29                               | 56,95                     | 44,27                    |
| 9                                                             | -20                      | Главный / Main                   | 77,87                               | 70,07                     | 54,46                    |
| 12                                                            | +355                     |                                  | 62,87                               | 56,57                     | 43,97                    |
| 13                                                            | +85                      | Северный (север) / North (north) | 50,58                               | 45,51                     | 35,38                    |
| 16                                                            | +130                     |                                  | 72,65                               | 65,37                     | 50,81                    |
| 22                                                            | +595                     | СКМ / SCM                        | 9,54                                | 44,57                     | 34,65                    |
| 25                                                            | +130                     | Южн. залежь / Southern deposit   | 33,37                               | 30,02                     | 23,34                    |
| Среднее по магнитным фракциям / Average by magnetic fractions |                          |                                  | 55,45                               | 52,6                      | 40,88                    |

Для оценки распределения магнетита в магнитных фракциях руд имеющих разную категорию обогатимости был произведен отдельный рентгеноструктурный анализ 3-х проб с разными классами крупности -0,5 + 0,16 мм и -0,16 + 0,05 мм: № 9 – легкообогатимой; № 13 – нормальнообогатимой и № 25 – труднообогатимой руды.

Результаты минералогического анализа магнитных фракций проб руды разной категории обогатимости представлены в табл. 6.

Таблица 6 / Table 6

**Минеральный состав магнитных фракций руды разной категории обогатимости / Mineral composition of magnetic ore fractions of different concentration categories.**

| № пробы / Sample no. | Категория обогатимости / Enrichment category  | Класс крупности, мм / Size class, mm | Минеральный состав, % / Mineral composition |                     |                     |                     |                   |
|----------------------|-----------------------------------------------|--------------------------------------|---------------------------------------------|---------------------|---------------------|---------------------|-------------------|
|                      |                                               |                                      | Магнетит / Magnetite                        | Пироксен / Pyroxene | Амфибол / Amphibole | Ильменит / Ilmenite | Хлорит / Chlorite |
| 9                    | Легкообогатимая / Easily enrichable           | -0,5+0,16                            | 82                                          | 5                   | 4                   | 3                   | 6                 |
|                      |                                               | -0,16+0,05                           | 67                                          | 18                  | 4                   | 1                   | 10                |
| 13                   | Нормально-обогатимая / Enriched normally      | -0,5+0,16                            | 76                                          | 14                  | 5                   | 2                   | 3                 |
|                      |                                               | -0,16+0,05                           | 49                                          | 39                  | 9                   | <1                  | 3                 |
| 25                   | Трудно-обогатимая / It is difficult to enrich | -0,5+0,16                            | 37                                          | 44                  | 9                   | 1                   | 9                 |
|                      |                                               | -0,16+0,05                           | 16                                          | 66                  | 9                   | <1                  | 8                 |

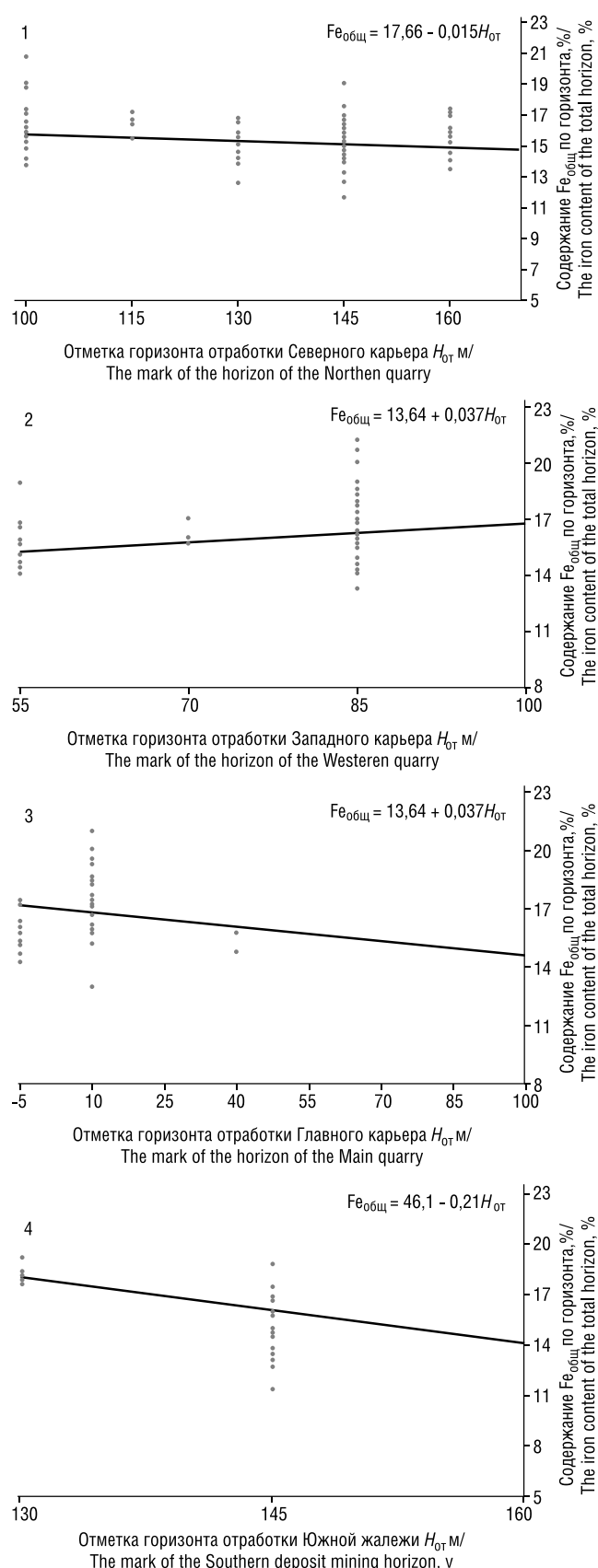


Рис. 2. Графики изменения содержания  $\text{Fe}_{\text{общ}}$  в руде по глубине отработки карьеров Гусевогорского месторождения: 1 - Северный карьер; 2 - Западный карьер; 3 - Главный карьер; 4 - карьер Южной залежи / Fig. 2. Graphs of changes in the total iron content in ore by the depth of quarrying of the Gusevogorsky deposit: 1 - Northern quarry; 2 - Western quarry; 3 - Main quarry; 4 - Southern Deposit quarry.



## Результаты исследований

По данным химико-минералогических исследований 21-й исходной пробы отобранных с разных карьеров, построены графики изменения содержания  $Fe_{общ}$  от глубины отработки карьеров (рис. 2).

На рис. 3 представлен обобщенный график влияния глубины добычи руды по карьерам Гусевогорского месторождения на изменение содержания  $Fe_{общ}$  с учетом его колебания по горизонтам отработки месторождения.

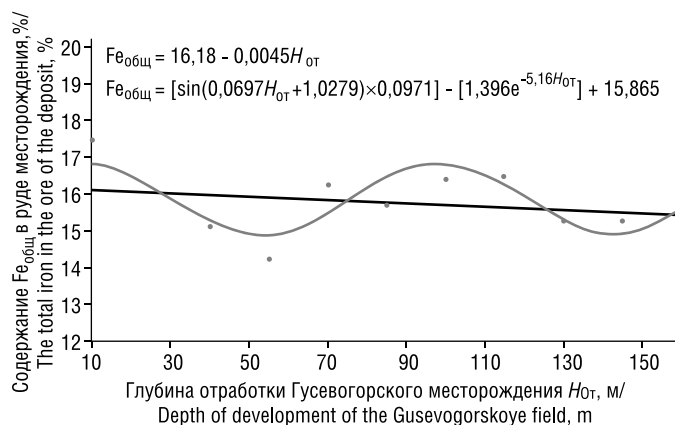


Рис. 3. Динамика влияния глубины добычи руды по карьерам Гусевогорского месторождения на содержание  $Fe_{общ}$  / Fig. 3. Dynamics of the influence of the depth of ore extraction in the quarries of the Gusevogorsky deposit on the total iron content.

- динамика изменения содержания  $Fe_{общ}$  с глубиной отработки / dynamics of changes in the iron content in common with the depth of mining.
- колебания содержания  $Fe_{общ}$  с изменением глубины отработки / fluctuations in the iron content are common with changes in the depth of mining.

## Обсуждение результатов исследований

В результате проведения исследований получены следующие результаты.

1. С увеличением глубины отработки Северного карьера наблюдается тенденция по снижению содержания  $Fe_{общ}$  в добываемой руде (в среднем по горизонту с 16,39 %  $Fe_{общ}$  до 15,62 %  $Fe_{общ}$  с разницей в 0,77 %);
2. По участкам Северного карьера отмечается следующее:
  - ✦ южный участок Северного карьера — в среднем по горизонту содержание  $Fe_{общ}$  изменяется с 17,79% до 12,54% (разница по глубине 45 м — 5,25%  $Fe_{общ}$ );
  - ✦ северный участок Северного карьера — с 14,0%  $Fe_{общ}$  до 10,97%  $Fe_{общ}$  (разница по глубине 45 м — 3,03%  $Fe_{общ}$ ), указанный результат может быть связан с повышением в руде силикатной составляющей;
  - ✦ с увеличением глубины отработки Западного карьера содержание  $Fe_{общ}$  в руде имеет слабовыраженный рост (в среднем по горизонту с 15,66%  $Fe_{общ}$  до 16,77%  $Fe_{общ}$ , с ростом  $Fe_{общ}$  на 1,1%), связанный со снижением силикатной составляющей;
  - ✦ между горизонтами -55 и -85 м наблюдается снижение  $Fe_{общ}$  в руде с 23,86%  $Fe_{общ}$  до 14,31%  $Fe_{общ}$  (разница по глубине 30 м — 9,55%  $Fe_{общ}$ ), что свидетельствует о высокой межгоризонтной дисперсии содержания  $Fe_{общ}$  с ростом глубины отработки залежи;

✦ с ростом глубины отработки Главного карьера и карьера Южной залежи прослеживается общая закономерность к снижению содержания  $Fe_{общ}$  в добываемой руде; для Главного карьера снижение составляет в среднем на 3,94%  $Fe_{общ}$ , для Южной залежи на 3,22%  $Fe_{общ}$ .

Установленные закономерности показывают, что на текущее время на карьерах АО «ЕВРАЗ КГОК» прослеживается общая тенденция к снижению содержания  $Fe_{общ}$  с глубиной отработки титаномагнетитовой руды, которое в среднем по карьерам на глубину 45 м составляет 1,71%  $Fe_{общ}$ . Это также характерно и для динамики изменения с глубиной отработки содержания железа магнетитового ( $Fe_{маг}$ ).

Выполнена оценка фактических объемов подаваемой из карьеров руды для обеспечения отношения  $Fe_{маг}/Fe_{общ}$  на уровне 0,64. Анализом сменных данных сводных показателей технологического баланса ОФ за 2021 г. установлено, что отношение  $Fe_{маг}/Fe_{общ}$  в размере 0,64 обеспечивается содержанием  $Fe_{общ}$  в 15,36-16,98 % и  $Fe_{маг}$  9,79-11,32 %.

Соотношения  $Fe_{маг}/Fe_{общ}$  за время работы предприятия в 2021 г. следующие:

- ✦ < 0,64 составило 34,4 % объемов подаваемой руды;
- ✦ 0,64 составило 42,2 % объемов подаваемой руды;
- ✦ > 0,64 составило 23,4 % объемов подаваемой руды.

В 2021 г. АО «ЕВРАЗ КГОК» начал масштабное освоение Собственно-Качканарского месторождения титаномагнетитов (СКМ), при этом доля руды с СКМ в общем рудопотоке в среднем увеличилась с 5,4% (I квартал 2021 г.) до 15,7% (IV квартал 2021 г.), в перспективе ожидается увеличение доли СКМ до 20-25 %.

Поэтому одним из направлений исследований являлась оценка изменения соотношения  $Fe_{маг}/Fe_{общ}$  с понижением горных работ в карьерах и установление рационального фазового состава рудной шихты для выдерживания его оптимального значения.

Оценка изменения отношения  $Fe_{маг}/Fe_{общ}$  по глубине разработки до 45 м показывает следующую динамику снижения качества руды:

- ✦ для Западного карьера снижение  $Fe_{маг}/Fe_{общ}$  с глубиной составляет от 0,82 до 0,55;
- ✦ для южного участка Северного карьера — от 0,74 до 0,70, для северного участка от 0,74 до 0,51;
- ✦ для Главного карьера снижение величины  $Fe_{маг}/Fe_{общ}$  — от 0,71 до 0,64.

Относительная доля карьеров Гусевогорского месторождения и соотношения  $Fe_{маг}/Fe_{общ}$  при варьировании объемов подачи руды с СКМ представлены в табл. 7 (с учетом сменных данных сводных показателей технологического баланса ОФ за 2021 г.).

По данным табл. 7 можно сделать следующие выводы:

- ✦ с увеличением доли руды СКМ в общем объеме рудной массы подаваемой на обогащения за 2021 г., снижение качественных характеристик шихты не наблюдается;
- ✦ отгруженная за 2021 г. рудная масса с карьеров Гусевогорского месторождения и СКМ в среднем характеризуется выдержанными параметрами качества и обеспечивает соотношение  $Fe_{маг}/Fe_{общ} = 0,64$ ;
- ✦ оценка фазового состава руд с карьеров для поддержания необходимого значения отношения  $Fe_{маг}/Fe_{общ} = 0,64$  обеспечивается следующим соотношением доли

Таблица 7 / Table 7

Доля карьеров АО «ЕВРАЗ КГОК», обеспечивающих подачу руды на обогащение (поданным работы ОФ за 2021 г.) / The share of quarries of JSC «EVRAZ KGO» providing the supply of ore for enrichment (according to the data of the work of the processing plant for 2021).

| Содержание Fe <sub>общ</sub> в исходной руде, %/ Total iron content in the source ore | Содержание Fe <sub>маг</sub> в исходной руде, %/ The content of magnetite iron in the source ore | Fe <sub>маг</sub> / Fe <sub>общ</sub> | Доля карьеров в подачи руды на обогащение, % / Pits shipped ore for enrichment |                   |               |                                |           |
|---------------------------------------------------------------------------------------|--------------------------------------------------------------------------------------------------|---------------------------------------|--------------------------------------------------------------------------------|-------------------|---------------|--------------------------------|-----------|
|                                                                                       |                                                                                                  |                                       | Северный/ Northern                                                             | Западный/ Western | Главный/ Main | Южная залежь/ Southern deposit | СКМ / SCM |
| СКМ 0% / SCM 0%                                                                       |                                                                                                  |                                       |                                                                                |                   |               |                                |           |
| 15,48                                                                                 | 9,84                                                                                             | 0,64                                  | 50,6                                                                           | 20,6              | 18,5          | 10,3                           | 0,0       |
| СКМ от 10% до 15,5% / SCM from 10% to 15,5%                                           |                                                                                                  |                                       |                                                                                |                   |               |                                |           |
| 15,55                                                                                 | 9,89                                                                                             | 0,64                                  | 45,2                                                                           | 16,4              | 19,9          | 8,0                            | 10,4      |
| 15,73                                                                                 | 10,09                                                                                            | 0,64                                  | 43,5                                                                           | 18,2              | 19,7          | 7,2                            | 11,4      |
| 15,85                                                                                 | 10,20                                                                                            | 0,64                                  | 44,4                                                                           | 16,7              | 19,3          | 7,2                            | 12,5      |
| 15,93                                                                                 | 10,28                                                                                            | 0,65                                  | 43,0                                                                           | 16,8              | 21,2          | 5,6                            | 13,4      |
| 16,00                                                                                 | 10,35                                                                                            | 0,65                                  | 41,7                                                                           | 16,5              | 22,4          | 5,1                            | 14,4      |
| 15,98                                                                                 | 10,32                                                                                            | 0,65                                  | 43,0                                                                           | 16,6              | 19,6          | 5,4                            | 15,4      |
| Среднее по группе / Group average                                                     |                                                                                                  |                                       |                                                                                |                   |               |                                |           |
| 15,84                                                                                 | 10,19                                                                                            | 0,65                                  | 43,5                                                                           | 16,9              | 20,4          | 6,4                            | 12,9      |
| СКМ от 15,5% до 20,5% / SCM from 15,5% to 20,5%                                       |                                                                                                  |                                       |                                                                                |                   |               |                                |           |
| 15,97                                                                                 | 10,34                                                                                            | 0,65                                  | 39,5                                                                           | 14,9              | 24,6          | 4,5                            | 16,5      |
| 15,80                                                                                 | 10,23                                                                                            | 0,65                                  | 38,5                                                                           | 20,7              | 21,9          | 1,8                            | 17,3      |
| 16,05                                                                                 | 10,41                                                                                            | 0,65                                  | 41,6                                                                           | 18,3              | 20,9          | 1,0                            | 18,3      |
| 16,13                                                                                 | 10,47                                                                                            | 0,65                                  | 42,6                                                                           | 13,6              | 24,8          | 0,0                            | 19,0      |
| 16,27                                                                                 | 10,64                                                                                            | 0,65                                  | 23,4                                                                           | 13,3              | 41,6          | 0,0                            | 21,7      |
| Среднее по группе / Group average                                                     |                                                                                                  |                                       |                                                                                |                   |               |                                |           |
| 16,04                                                                                 | 10,42                                                                                            | 0,65                                  | 37,1                                                                           | 16,2              | 26,8          | 1,5                            | 18,6      |

карьер в общем рудопотоке: Северный – 40%, Главный – 24%, Западный – 17%, СКМ – 15%, Южная залежь – 4%.

#### Заключение

1. Установлена тенденция по снижению содержаний железа  $Fe_{\text{маг}}$  и  $Fe_{\text{общ}}$  с понижением глубины отработки Гусевгорского месторождения по всем карьерам, которая в перспективе окажет негативное влияние на величину соотношения  $Fe_{\text{маг}}/Fe_{\text{общ}}$  в сторону его уменьшения ниже требуемого уровня (0,64).

2. Основной причиной снижения качественных показателей с глубиной отработки является рост доли силикатной

составляющей в добываемой руде, что приводит к снижению отношения  $Fe_{\text{маг}}/Fe_{\text{общ}}$  и способствует повышению содержания железа в хвостах обогащения (~до 7,5%). Среднее снижение по карьерам  $Fe_{\text{общ}}$  на глубину 45 м составляет 1,71%,  $Fe_{\text{маг}}$  – 4,27%.

3. Увеличение доли руды из карьера СКМ в общем объеме рудной массы подаваемой на обогащение по оценке данных технологического баланса 2021 г. не приводит к снижению качественных характеристик рудной шихты. На ближайшую перспективу соотношение  $Fe_{\text{маг}}/Fe_{\text{общ}}$  на требуемом уровне (0,64) достигается управлением фазовым составом (долей) руды с карьеров Гусевгорского месторождения и СКМ. ■

#### БЛАГОДАРНОСТИ/ACKNOWLEDGMENTS:

Авторы выражают особую признательность и большую благодарность своим коллегам из лаборатории управления качеством минерального сырья ИГД УрОРАН, а также коллективу редакции «Маркшейдерия и недропользование» за поддержку и помощь в написании и оформлении статьи / The authors express special gratitude and great gratitude to their colleagues from the Laboratory of Mineral Raw Materials Quality Management of the IGD Ural Branch of the Russian Academy of Sciences, as well as to the editorial staff of «Surveying and Subsoil Use», for their support and assistance in writing and formatting the article.

Работа выполнена в рамках НИР Тема 1 «Методологические основы стратегии комплексного освоения запасов месторождений твердых полезных ископаемых в динамике развития горнотехнических систем» (FUWE-2022-0005), рег. №1021062010531-8-1.5.1. / Methodological foundations of the strategy of integrated development of reserves of solid mineral deposits in the dynamics of development of mining systems (FUWE-2022-0005), reg. №.1021062010531-8-1.5.1.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Пахомов Ф. П. Титаномагнетитовые месторождения России: минерально-сырьевая база, перспективы освоения и комплексного использования /Ф.П. Пахомов, Л. П. Тигунов, Л. З. Быховский// М.: ВИМС, 2010. - 138 с.
2. Фоминых В. Г. Петрология и рудогенезис Качканарского массива /В. Г. Фоминых, Ю. П. Краева, Н. В. Ларина // УНЦ АН СССР. Свердловск, 1987. - 184 с.

3. Быховский Л.З. Минерально-сырьевая база и перспективы комплексного использования титаномагнетитовых и ильменитовых магматогенных месторождений России /Л.З. Быховский, Ф.П. Пахомов, М.А. Турлова // Горный информационно-аналитический бюллетень - 2008. - № 1 - С. 209-215.
4. Быховский Л.З. Комплексные руды титаномагнетитовых месторождений России крупная минерально-сырьевая база черной металлургии/Л.З. Быховский, Ф.П. Пахомов, М.А. Турлова // Разведка и охрана недр. - 2007. - № 6. - С. 20-23.
5. Кантемиров В.Д. Оценка влияния минерального состава титаномагнетитовой руды Гусевогорского месторождения на результаты магнитного обогащения /В.Д. Кантемиров, Р.С. Титов // Маркшейдерия и Недропользование. - 2017.- №. 3(88). С. 49 - 52.
6. Кантемиров В.Д. Изучение объемного веса титаномагнетитовой руды Гусевогорского месторождения / В.Д. Кантемиров, Р.С. Титов, А.М. Яковлев // Маркшейдерия и Недропользование. - 2017.- №.2(88). С. 18 - 21.
7. Титов Р.С. Исследование влияния морфологических типов ильменита на обогатимость титаномагнетитовой руды Гусевогорского месторождения /Р.С. Титов // Горный информационно-аналитический бюллетень. - 2021. - №. 5-1 - С. 192-205.
8. Кантемиров В.Д. Прогноз изменчивости объемного веса титаномагнетитовых руд по глубине Гусевогорского месторождения Среднего Урала /В.Д. Кантемиров, Р.С. Титов, А.М. Яковлев // Физико-технические проблемы разработки полезных ископаемых. - 2017. - № 6 - С. 149-154.
9. Ляпунов А.В. Обогащительные перспективы ЕВРАЗ КГОКа / А.В. Ляпунов, С.Ю. Макушев // Глобус. - 2019. - № 4. - С. 139-145.
10. Макушев С.Ю. Дробильно-обогащительная фабрика ОАО "ЕВРАЗ КГОК" / С.Ю. Макушев, И. В.Канаев, Д. В. Черепанов // Горный журнал. - 2013. - № 9-1 Спец. выпуск. - С. 13-16.
11. Смирнов, Л.А. Современное состояние и перспективы титаномагнетитового ванадийсодержащего сырья в России /Л.А. Смирнов, А.В. Кушнарев // Черная металлургия. - 2013. - № 5. - С. 3-21.
12. Пелевин А.Е. Магнитные и электрические методы обогащения: учебник / А.Е. Пелевин// Екатеринбург: Изд-во УГТУ, 2018. - 296 с.
13. Пелевин А.Е. Стадиальное выделение железного концентрата с помощью барабанного магнитного сепаратора с модифицированной ванной / А.Е. Пелевин, Н.А. Сытых // Обогащение руд. - 2016. - № 4. - С. 10-15.
14. Седьмов Н.А. Магнетоминералогические особенности магнетита из различных осадочных пород и отложений / Н.А. Седьмов, В.Ф. Бабанин, В.В. Морозов, А.А. Залуцкий, В.И. Трухин, С.А. Шоба // Вестник Московского университета. Серия 3. Физика. Астрономия. - 2004. - № 1. - С. 59-65.
15. Коннова Н.И. Рудная и технологическая минералогия: учеб. пособие / Н.И. Коннова // Красноярск: Сиб. федер. ун-т, 2019. - 176 с.
16. Булах А.Г. Минералогия: учебник / А.Г. Булах // М.: Издательский центр «Академия», 2011. - 288 с.
17. Малышева Т.Я. Петрография и минералогия железорудного сырья: учеб. пособие /Т.Я. Малышева, О.А. Долицкая // М.: МИСИС, 2004. - 422 с.
18. Октябрьский Р.А. Химический состав и геохимические особенности Кокшаровского щелочно-ультраосновного массива с карбонатитами (Приморье) / Р.А. Октябрьский, Н.В. Владыкин, А.М. Ленников, А.А. Вржосек, Т.А. Ясныгина, С.В. Расказов, Е.Ю. Москаленко, Т.А. Веливецкая // Геохимия. - 2010. - № 8. - С. 829-842.
19. Вотяков С.Л. Мессбауэровское исследование железа в минералах околорудной зоны Кусинского ильменит-магнетитового месторождения (Южный Урал) / С.Л. Вотяков, Н.С. Бородин, С.В. Прибавкин, В.В. Холоднов, Г.Б. Ферштатер, О.Л. Галахова, А.Б. Миронов // Геохимия. - 2005. - № 12. - С. 1284-1296.
20. Симаков В.А. Рентгенофлуоресцентное определение железа магнетита в железных рудах после предварительной магнитной сепарации / В.А. Симаков, В.Е. Исаев // Заводская лаборатория. Диагностика материалов. - 2014. - Т. 80. - № 12. - С. 16-19.
21. Чубаров В.М. Сопоставление способов подготовки проб и коррекции матричных эффектов для рентгенофлуоресцентного определения общего железа и породообразующих элементов в железных рудах / В.М. Чубаров, Е.И. Борхонова, А.А. Амосова // Аналитика и контроль. - 2020. - Т. 24. - № 2. - С. 107-113.
22. Чубаров В.М. Определение фазового состава железных руд методом физико-химического моделирования / В.М. Чубаров, А.В. Ощепкова, Е.М. Кондратьева, Е.В. Канева // Минералы: строение, свойства, методы исследования. - 2020. - № 11. - С. 312-315.

## REFERENCES

1. Pakhomov F.P. Titanomagnetite deposits in Russia: mineral resource base, prospects for development and integrated use / F.P. Pakhomov, L.P. Tigunov, L.Z. Bykhovsky // М.: VIMS, 2010. - 138 p.
2. Fominykh V.G. Petrology and ore genesis of the Kachkanar massif /V G. Fominykh, Yu.P. Kraeva, N.V. Larina // UC USSR Academy of Sciences. Sverdlovsk, 1987. - 184 p.
3. L.Z. Mineral resource base and prospects for the integrated use of titanomagnetite and ilmenite magmatogenic deposits in Russia /L.Z. Bykhovsky, F.P. Pakhomov, M.A. Turlova // Mining Information and Analytical Bulletin - 2008. - No. 1 - P. 209-215.
4. Bykhovskiy L.Z. Complex ores of titanomagnetite deposits in Russia large mineral resource base of ferrous metallurgy /L.Z. Bykhovsky, F.P. Pakhomov, M.A. Turlova // Exploration and protection of mineral resources. - 2007. - No. 6. - S. 20-23.
5. Kantemirov V.D. Evaluation of the influence of the mineral composition of the titanomagnetite ore of the Gusevogorsk deposit on the results of magnetic enrichment /V.D. Kantemirov, R.S. Titov // Mine Surveying and Subsoil Use. - 2017.- no. 3(88). pp. 49 - 52.
6. Kantemirov V.D., Titov R.S., Yakovlev A.M. The study of the volumetric weight of titanomagnetite ore of the Gusevogorskoye deposit / V.D. Kantemirov, R.S. Titov, A. M.Yakovlev. - 2017. - No. 2 (88). pp. 18 - 21.
7. Titov R.S. Study of the effect of morphological types of ilmenite on the washability of titanomagnetite ore of the Gusevogorsk deposit /R.S. Titov // Mining Information and Analytical Bulletin. - 2021. - no. 5-1 - S. 192-205.
8. Kantemirov V.D. Forecast of the variability of the volumetric weight of titanomagnetite ores along the depth of the Gusevogorsk deposit in the Middle Urals /V.D. Kantemirov, R.S. Titov, A.M. Yakovlev // Physical and technical problems of mining. - 2017. - No. 6 - S. 149-154.



9. Lyapunov A.V., Makushev S.Yu. Enrichment prospects of EVRAZ KGOK // Globus. - 2019. - No. 4. - P. 139-145.
10. Makushev S.Yu. Crushing and processing plant of EVRAZ KGOK OJSC / S.Yu. Makushev, I.V. Kanaev, D.V. Cherepanov // Mining Journal. - 2013. - No. 9-1 Spec. release. - P. 13-16.
11. Smirnov, L.A. Current state and prospects of titanium-magnetite vanadium-containing raw materials in Russia / L.A. Smirnov, A.V. Kushnarev // Ferrous metallurgy. - 2013. - No. 5. - P. 3-21.
12. Pelevin A.E. Magnetic and electrical enrichment methods: textbook / A. E. Pelevin // Yekaterinburg: Publishing House of USGU, 2018. - 296 p.
13. Pelevin, A.E., Sytykh, N.A., Sytykh, N.A., Enrichment of ore. - 2016. - No. 4. - P. 10-15.
14. Sed'mov N.A. Magnetomineralogical features of magnetite from various sedimentary rocks and deposits / N.A. Sed'mov, V.F. Babanin, V.V. Morozov, A.A. Zalutsky, V.I. Trukhin, S.A. Shoba // Moscow University Bulletin. Series 3. Physics. Astronomy. - 2004. - No. 1. - S. 59-65.
15. Konnova N.I. Ore and technological mineralogy: textbook. allowance / N.I. Konnova // Krasnoyarsk: Sib. feder. un-t, 2019. - 176 p.
16. Bulakh A.G. Mineralogy: textbook / A.G. Bulakh // M.: Publishing Center «Academy», 2011. - 288 p.
17. Malysheva T.Ya. Petrography and mineralogy of iron ore raw materials: textbook. allowance / T.Ya. Malysheva, O A. Dolitskaya // M.: MISIS, 2004. - 422 p.
18. Oktyabrsky, R.A., Vladikin, N.V., Lennikov, A.A., Vrzhosek, T.A. Yasnygina, S.V. Raskazov, E.Yu. Moskalenko, and T.A. Velivetskaya, Geochem. - 2010. - No. 8. - P. 829-842.
19. Votyakov S.L., Borodina N.S., Pribavkin S.V., Kholodnov V.V., G.V. B. Fershtater, O.L. Galakhova, A.B. Mironov // Geochemistry. - 2005. - No. 12. - S. 1284-1296.
20. Simakov V.A., Isaev V.E. X-ray fluorescence determination of iron magnetite in iron ores after preliminary magnetic separation // Factory laboratory. material diagnostics. - 2014. - T. 80. - No. 12. - S. 16-19.
21. Chubarov V.M., Borkhonova E.I., Amosova A.A. Comparison of methods of sample preparation and correction of matrix effects for X-ray fluorescence determination of total iron and rock-forming elements in iron ores // Analytics and control. - 2020. - T. 24. - No. 2. - S. 107-113.
22. Chubarov V.M., Oshchepkova A.V., Kondrat'eva E.M., Kaneva E.V. Determination of the phase composition of iron ores by physical and chemical modeling // Minerals: structure, properties, methods. research. - 2020. - No. 11. - P. 312-315.

## ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ



**Кантемиров Валерий Данилович:**  
кандидат технических наук,  
заведующий лабораторией,  
Управление качеством минерального сырья,  
Институт горного дела УрО РАН.  
г. Екатеринбург, Россия,  
e-mail: ukrkant@mail.ru,  
ORCID: 0000-0001-6486-2740

## INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

**Kantemirov Valery Danilovich:**  
Ph.D.,  
Quality management laboratory chief,  
Institute of Mining of Ural branch of RAS,  
Yekaterinburg, Russia,  
e-mail: ukrkant@mail.ru,  
ORCID: 0000-0001-6486-2740



**Титов Роман Сергеевич:**  
старший научный сотрудник,  
лаборатория Управления качеством минерального сырья,  
Институт горного дела, Уральское Отделение  
Российской Академии Наук.  
г. Екатеринбург, Россия,  
e-mail: ukrigd15@mail.ru

**Titov Roman Sergeevich:**  
senior researcher,  
Quality management laboratory,  
Institute of Mining of Ural branch of Russian Academy  
of Sciences,  
Yekaterinburg, Russia,  
e-mail: ukrigd15@mail.ru



**Яковлев Андрей Михайлович:**  
старший научный сотрудник,  
лаборатория Управления качеством минерального сырья,  
Институт горного дела, Уральское Отделение  
Российской Академии Наук.  
г. Екатеринбург, Россия,  
e-mail: quality@igduran.ru

**Yakovlev Andrei Michailovich:**  
senior researcher,  
Quality management laboratory,  
Institute of Mining of Ural branch of Russian Academy  
of Sciences,  
Yekaterinburg, Russia,  
e-mail: quality@igduran.ru

## КРИТЕРИИ АВТОРСТВА / CONTRIBUTION OF THE AUTHORS

Авторы заявляют о равном вкладе каждого в работу над статьей. / The authors participated equally in the writing and collection of the material, as well as its processing.

## КОНФЛИКТ ИНТЕРЕСОВ / CONFLICT OF INTEREST

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов. / The authors declare no conflict of interest.