

УДК 549:622.7:553.31(477.63)

ДЕЯКІ ЗАКОНОМІРНОСТІ ТЕХНОЛОГІЧНОЇ МІНЕРАЛОГІЇ ЗАЛІЗНИХ РУД ГАННІВСЬКОГО РОДОВИЩА КРИВБАСУ

С. Карпенко, В. Євтехов, А. Євтехова

*Криворізький технічний університет
50002 м. Кривий Ріг, вул. Пушкіна, 44
E-mail: evtekhov@mail.ru*

Наведено результати дослідження мінерального, хімічного складу і показників збагачення магнетитових руд Ганнівського родовища (Кривбас). З'ясовано, що між основними мінералогічними, хімічними компонентами руд і якістю, виходом залізородного концентрату, вилученням до концентрату заліза і втратами заліза у відходах збагачення є тісний кореляційний зв'язок. Наголошено на необхідності проведення детальних мінералого-технологічних досліджень руд для підвищення ефективності їхнього використання.

Ключові слова: залізисто-кремениста формація, магнетитові руди, мінеральний склад, хімічний склад, збагачення руд, Криворізький басейн.

Ганнівське родовище бідних магнетитових руд (магнетитових кварцитів) геологічно відповідає Східноганнівській залізородній смузі, розташованій у межах Північного залізородного району Криворізького басейну (рис. 1).

Залізородна товща родовища простягається в субмеридіальному напрямі на 17 км [1, 2, 5]. Родовище розробляють Ганнівським кар'єром Північного гірничо-збагачувального комбінату (ПнГЗК) з початку 70-х років ХХ ст. За 35 років експлуатації видобуто понад 300 млн т залізної руди.

У геологічній будові Ганнівського родовища (рис. 2) беруть участь метаморфічні породи криворізької серії, розділені (знизу догори) на новокриворізьку, скелеватську, саксаганську, гданцівську і глеєватську світи.

Продуктивну товщу родовища формують п'ятий і шостий залізисті горизонти саксаганської світи. Через незначну потужність шостого сланцевого горизонту, який їх розділяє, його також зачислено до продуктивної товщі.

Вплив мінералогічних чинників на збагачуваність бідних магнетитових руд родовища детально досліджували в процесі залучення родовища до експлуатації та протягом перших десяти років видобутку і збагачення руд (70-ті й початок 80-х років ХХ ст.) [3, 4].

Визначено загальні закономірності технологічної мінералогії руд, серед яких – висновки про існування прямої залежності між якістю концентрату (β) і загальним вмістом заліза в руді ($Fe_{\text{заг}}$), вмістом у ній заліза, яке є в складі магнетиту ($Fe_{\text{магн}}$), а також про пряму залежність виходу концентрату (γ), вилучення заліза з руди до концентрату в разі збагачення (ϵ) від вмісту в складі руди $Fe_{\text{заг}}$ і $Fe_{\text{магн}}$.

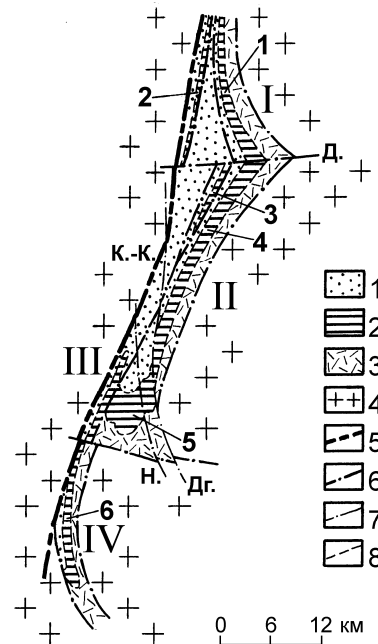
Також виявлено, що між вмістом $Fe_{\text{заг}}$ та $Fe_{\text{магн}}$ у складі руди і втратами заліза у відходах (хвостах) збагачення (θ) суттєвого зв'язку нема.

Рис. 1. Положення Ганнівського родовища в межах Криворізького басейну:

1 – метакластоліти і доломітові мармури глеєватської і гданцівської світ; 2 – залізисті кварцити і сланці саксаганської світи; 3 – метакластоліти, метаультрабазити і метабазити скелеватської, новокриворізької світ і конкської серії; 4 – гранітоїди дніпропетровського і саксаганського комплексів; 5 – Криворізько-Кременчуцький глибинний (мантіїний) розлом (К.-К.); 6 – корово-мантіїні розломи (Д. – Девладівський); 7 – корові розломи (Дг. – Діагональний, Н. – Новокриворізький); 8 – лінії стратиграфічних контактів.

Залізородні райони: I – Північний (Ганнівський); II – Центральний (Саксаганський); III – Південний; IV – Інгулецький (Лихманівський).

Залізородні смуги: 1 – Східноганнівська; 2 – Західноганнівська; 3 – Дальні Західні смуги; 4 – Саксаганська; 5 – замикання Основної структури; 6 – Лихманівська.



Протягом останніх років активізувались геологічні, мінералогічні й технологічні дослідження, спрямовані на підвищення ефективності утилізації мінерально-сировинної бази залізних руд родовищ Кривбасу, у тому числі Ганнівського, а також використання природного потенціалу руд з урахуванням їхніх мінералогічних і петрографічних особливостей під час розробки ефективних схем збагачення. Вирішення цієї проблеми дасть змогу забезпечити зростання якісних показників залізородного концентрату (загальний вміст у його складі заліза, вміст баластних (SiO_2 , Al_2O_3 , CaO) і шкідливих (S , P_2O_5 , K_2O , Na_2O) домішок), збільшити його вихід, підвищити вилучення заліза з руди до концентрату і зменшити втрати заліза у відходах збагачення (хвостах).

Під час збирання вихідного матеріалу увагу вчених привернув різний рівень деталізації попередніх мінералогічних, петрографічних, петрохімічних і технологічних досліджень. Йдеться про те, що геологорозвідувальні, науково-дослідні організації та геологічна, технологічна служби ПнГЗК використовували різні показники для оцінки якості залізних руд родовища.

Більшість проб, одержаних з керна розвідувальних свердловин і забоїв кар'єру, вивчали за скороченою схемою з визначенням вмісту в складі руди $\text{Fe}_{\text{заг}}$ і $\text{Fe}_{\text{магн}}$, а також технологічних показників. Кількість таких проб перевищує 10 тис.

Для значно меншої кількості проб (близько 3 тис.) визначали також показники фазового складу заліза, які характеризували його розподіл між основними мінеральними фазами (вміст заліза у складі магнетиту – $\text{Fe}_{\text{магн}}$, мартиту – $\text{Fe}_{\text{март}}$, залізної слюдки і гідроксидів заліза – $\text{Fe}_{\text{гем+гідр}}$, силікатів і карбонатів – $\text{Fe}_{\text{сил+карб}}$, іноді сульфідів – $\text{Fe}_{\text{сульф}}$). Близько 1 000 проб мали також дані про вміст деяких породоутворювальних і другорядних хімічних компонентів (SiO_2 , Al_2O_3 , CaO , в.п.п. (втрата маси проби під час прожарювання) та деякі інші).

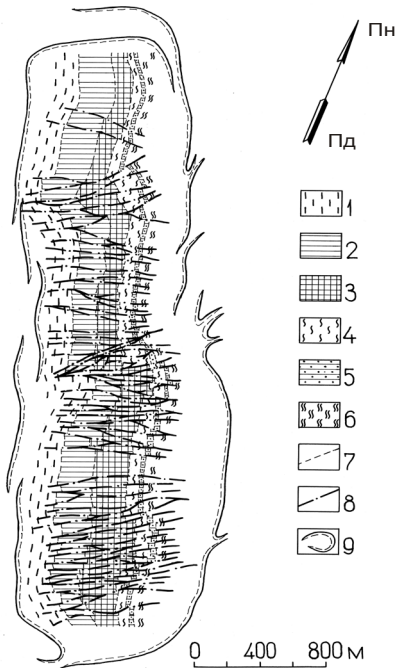


Рис. 2. Схематична геологічна карта Ганнівського родовища:

1 – кварцити мономінеральні, магнетитові та силікатні, сланці мусковіт-кварц-біотитові, кварц-біотитові, роговообманково-кварц-біотитові (гданцівська світа); 2 – кварцити магнетит-біотит-кумінгтонітові, магнетит-кумінгтонітові, магнетит-кумінгтоніт-магнезіорибекітові (надрудна товща саксаганської світи); 3 – кварцити магнетитові, залізнослюдково-магнетитові, кумінгтоніт-магнетитові, рибекіт-магнетитові, метасоматити рибекіт-магнетит-егіринові (рудна товща); 4 – сланці гранат-біотит-кварц-кумінгтонітові, гранат-кварц-біотитові, гранат-ставроліт-біотит-кварц-мусковітові (третій-п'ятий сланцеві горизонти); 5 – кварцити біотит-магнетит-кумінгтонітові, магнетит-гранат-біотит-кумінгтонітові (перший-другий залізисті горизонти); 6 – сланці гранат-біотит-кварц-кумінгтонітові, гранат-кварц-біотитові, гранат-ставроліт-біотит-кварц-мусковітові (третій-п'ятий сланцеві горизонти); 7 – лінії контактів стратиграфічних горизонтів; 8 – розривні порушення; 9 – контур Ганнівського кар'єру (ПНГЗК).

Виявлено також дані про понад 100 проб залізних руд, які містили повну мінералогічну, геологічну і технологічну характеристику.

Всі ці проби одержані з керна свердловин детальної та експлуатаційної розвідки Ганнівського родовища. Розподіл проб порівняно рівномірний по простяганню продуктивної товщі й на глибину, отже, вони досить надійно і повно характеризують склад і технологічні показники руд родовища.

Результати хімічних аналізів і мінералого-технологічних експериментів опрацьовані з використанням стандартних статистичних програм.

За даними кореляційного аналізу виявлено досить тісні позитивні й негативні зв'язки між мінералого-петрохімічними характеристиками і технологічними параметрами руд.

Головним показником, який визначає якість залізородного концентрату, є загальний вміст у його складі заліза (β , мас. %). Зв'язок цього показника з загальним вмістом заліза в руді (рис. 3) досить тісний позитивний (коефіцієнт парної кореляції $r = 0,61$) (див. таблицю).

За відомим $Fe_{\text{заг}}$ значення β можна обчислити, використовуючи рівняння

$$\beta = 0,38 Fe_{\text{заг}} + 52,90.$$

Зв'язок значень β і $Fe_{\text{магн}}$ слабший, $r = 0,34$ (рис. 4). Залежність між цими параметрами визначена рівнянням

$$\beta = 0,27 Fe_{\text{магн}} + 59,57.$$

Слабкість зв'язку пояснюють різним розміром індивідів і агрегатів магнетиту в залізних рудах проміжної якості (на діаграмі рис. 4 інтервал вмісту $Fe_{\text{магн}}$ – від 25 до 30 мас. %). Руди з крупновкрапленим магнетитом забезпечують високий (до 70 мас. %) загальний вміст заліза в концентраті (фігуративні точки руд розташовані над лінією усереднених значень показників на діаграмах рис. 3, 4).

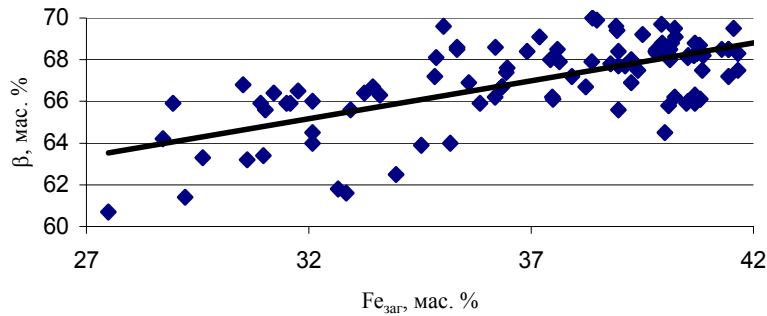


Рис. 3. Характер залежності між показниками загального вмісту заліза в концентраті β і загального вмісту заліза в руді $Fe_{заг}$.

Коефіцієнти парної кореляції значень петрохімічних і технологічних показників руд Ганнівського родовища

Компоненти	Показники			
	γ	β	ϵ	ϑ
$Fe_{заг}$	0,44	0,61	-0,09	0,38
$Fe_{магн}$	0,81	0,34	0,56	-0,42
SiO_2	-0,44	-0,59	0,07	-0,34
Al_2O_3	-0,32	-0,29	-0,11	-0,08
Fe_2O_3	0,26	0,58	-0,25	0,54
FeO	0,44	-0,11	0,54	-0,61
MnO	0,04	-0,18	0,09	-0,21
MgO	0,19	-0,08	0,39	-0,43
CaO	0,001	-0,34	0,27	-0,47
Na_2O	-0,16	-0,14	0,09	-0,2
K_2O	-0,22	0,01	-0,03	-0,03
P_2O_5	0,02	0,35	-0,01	0,01
CO_2	-0,24	-0,33	-0,01	-0,24
S	-0,42	-0,5	-0,07	-0,22
$V.п.п$	-0,41	-0,59	-0,04	-0,24
γ	1			
β	0,21	1		
ϵ	0,83	0,05	1	
ϑ	-0,48	0,31	-0,69	1

Технологія збагачення руди, яку використовують на ПнГЗК, не забезпечує повного розкриття індивідів і агрегатів магнетиту деяких різновидів руд дрібнокрупленої структури. Внаслідок цього утворюється велика кількість зростків магнетиту з нерудними мінералами (кварц, кумінгтоніт, рибекіт, егірін та ін.). Захоплення їх під час магнітної сепарації концентратом зумовлює зниження загального вмісту заліза в концентраті β до 62–63 мас. % (фігуративні точки руд, які розташовані нижче лінії середніх показників на діаграмах рис. 3, 4).

Для інших технологічних параметрів руд (γ , ϵ , ϑ) статистичні дослідження дали змогу вперше для родовища визначити нелінійність зв'язку їхніх значень зі значеннями мінерало-хімічних показників руд.

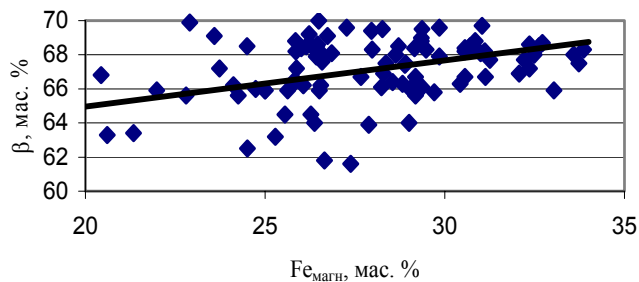


Рис. 4. Характер залежності між показниками загального вмісту заліза в концентраті β і вмісту в руді заліза, яке є в складі магнетиту, $Fe_{\text{магн}}$.

Вихід концентрату γ , який характеризує кількість концентрату, одержаного з певної кількості вихідної руди, пов'язаний чіткою залежністю із вмістом у руді заліза, яке є в складі магнетиту (рис. 5). Прогнозне значення γ можна обчислити за рівнянням

$$\gamma = 1,2948 Fe_{\text{магн}} + 6,6872.$$

Коефіцієнт кореляції між цими показниками дуже високий (див. таблицю), що зумовлено практично мономінеральним складом магнетитового концентрату. Складніша нелінійна залежність виявлена між показниками γ і $Fe_{\text{заг}}$ (рис. 6).

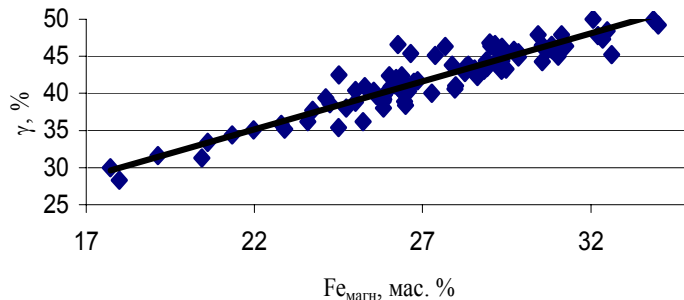


Рис. 5. Характер залежності між показниками виходу концентрату γ і вмісту в руді заліза, яке є в складі магнетиту, $Fe_{\text{магн}}$.

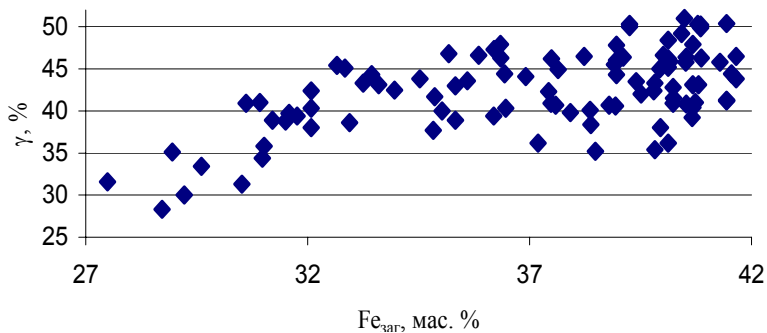


Рис. 6. Характер залежності між показниками виходу концентрату γ і загальним вмістом заліза у складі руди $Fe_{\text{заг}}$.

За порівняно низьких значень $Fe_{\text{заг}}$ (27–35 мас. %) спостережено достатньо чітку пряму залежність між цими показниками, за вищих значень $Fe_{\text{заг}}$ (33–37 мас. %) її поступово змінює негативна. Це можна пояснити тим, що високозалізістим рудам родовища властивий високий вміст гематиту, який через слабку питому магнітну сприйнятливості не потрапляє до магнетитового концентрату. Втрата значної кількості гематиту у відходах збагачення зумовлює зменшення виходу концентрату.

Вилучення заліза до концентрату (ϵ) характеризує загальну ефективність технології збагачення руди. Для різних за мінеральним складом руд родовища значення ϵ коливається від 60 до 90 %. Найменші показники мають руди з низьким вмістом магнетиту і, відповідно, високим вмістом мінералів з незначною питомою магнітною сприйнятливості (гематит, силікати й карбонати заліза). Найбільші показники ϵ властиві практично бімінеральним (магнетит + кварц) рудам. Загалом між показниками ϵ і $Fe_{\text{магн}}$ є пряма залежність; значення ϵ (рис. 7, див. таблицю) в разі прогнозування технологічних показників руд можна визначити за рівнянням

$$\epsilon = 1,1472 Fe_{\text{магн}} + 45,16.$$

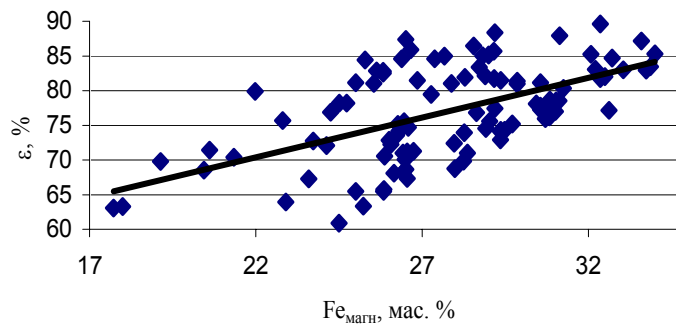


Рис. 7. Характер залежності між показниками вилучення заліза до концентрату ϵ та вмісту в руді заліза, яке є в складі магнетиту, $Fe_{\text{магн}}$.

Взаємний зв'язок ϵ і $Fe_{\text{заг}}$ складніший, подібний до характеру залежності між γ і $Fe_{\text{заг}}$. Також простежено неоднозначність залежності показників цих параметрів. Для порівняно бідних руд (магнетит-кунінгтонітові, кунінгтоніт-магнетитові) із загальним вмістом заліза 27–33 мас. % виявлено прямий зв'язок між зазначеними показниками. Для руд із загальним вмістом заліза 33–37 мас. % суттєвого зв'язку між ϵ і $Fe_{\text{заг}}$ не зафіксовано (руди кунінгтоніт-магнетитового, рибекіт-магнетитового, магнетитового складу). У разі збагачення руд з високим загальним вмістом заліза (33–42 мас. %), в яких мало силікатів і багато гематиту (залізнослюdkово-магнетитові, магнетит-залізнослюdkові кварцити), через підвищені втрати заліза у відходах збагачення простежено зворотній зв'язок між показниками ϵ і $Fe_{\text{заг}}$ (рис. 8).

Втрати заліза під час збагачення у відходах характеризує показник ϑ – загальний вміст заліза у хвостах. Між значеннями показників ϑ і $Fe_{\text{магн}}$ є досить слабкий (див. таблицю) негативний кореляційний зв'язок ($r = -0,42$). Низькі значення втрат заліза властиві так званим малорудним магнетит-кунінгтонітовим і частково – кондичійним кунінгтоніт-магнетитовим кварцитам (на діаграмі рис. 9 – значення $Fe_{\text{магн}}$ у межах 17–22 мас. %), а також висококондичійним магнетитовим кварцитам (вміст $Fe_{\text{магн}}$ перевищує 32 мас. %). Висока варіативність значень ϑ виявлена для залізнослюdkово-магнетитових і магнетит-залізнослюdkових кварцитів (вміст $Fe_{\text{магн}}$

– між 22 і 32 мас. %), що зумовлено втратами в хвостах збагачення слабкомагнітного високозалізного мінералу – гематиту.

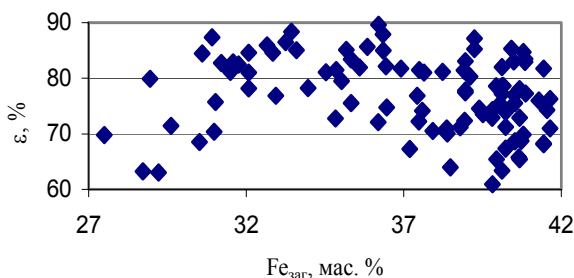


Рис. 8. Характер залежності між показниками вилучення заліза до концентрату ϵ і загальним вмістом заліза в складі руди $Fe_{\text{заг}}$.

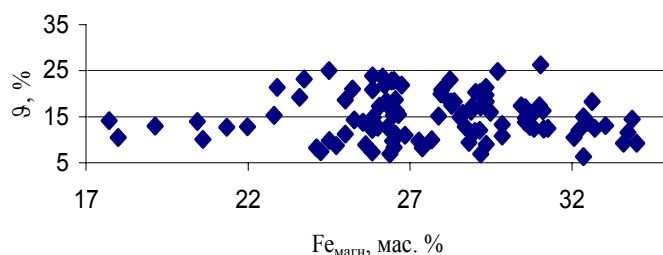


Рис. 9. Характер залежності між показниками втрат заліза у відходах збагачення θ і вмісту в руді заліза, яке є в складі магнетиту, $Fe_{\text{магн}}$.

Цей висновок підтверджують результати вивчення залежності між показниками θ і $Fe_{\text{заг}}$. На діаграмі рис. 10 поле поширення фігуративних точок з найбільшою варіативністю і максимальними значеннями θ відповідає інтервалу значень $Fe_{\text{заг}}$ понад 38 мас. %, які характерні для залізнослюdkово-магнетитових і магнетит-залізнослюdkових кварцитів.

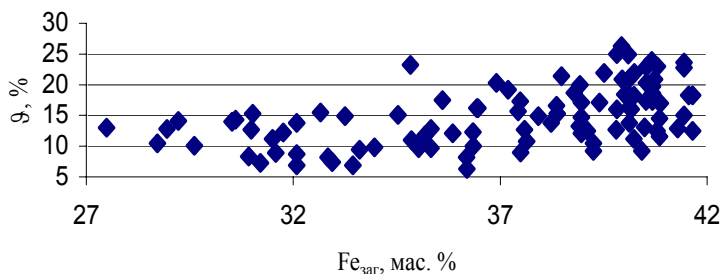


Рис. 10. Характер залежності між показниками втрат заліза у відходах збагачення θ і загальним вмістом заліза в складі руди $Fe_{\text{заг}}$.

Отже, для Ганнівського родовища характерний високий рівень варіативності мінерального і хімічного складу порід і, як наслідок, показників їхнього збагачення. Причина полягає в складній багатостадійній історії їхнього формування. За даними визначення хімічного складу і збагачуваності руд виявлено тісні позитивні й негативні кореляційні зв'язки між їхніми хімічними і технологічними показниками.

Одержані закономірності дають змогу на стадії прогнозування збагачуваності руд обчислити їхні технологічні показники за відомими значеннями хімічних параметрів. З огляду на переоцінку мінерально-сировинної бази Ганнівського родовища для підвищення ефективності використання руд необхідні детальні мінералогічно-технологічні дослідження.

1. *Акименко Н.М., Белевцев Я.Н., Горошников Б.И.* и др. Геологическое строение и железные руды Криворожского бассейна. М.: Госгеолтехиздат, 1957. 280 с.
2. *Белевцев Я.Н., Тохтуев Г.В., Стрыгин А.Н.* и др. Геология Криворожских железорудных месторождений. Киев: Изд. АН УССР, 1962. Т. 1. 484 с.; Т. 2. 567 с.
3. *Пирогов Б.И.* Геолого-минералогические факторы, определяющие обогатимость железистых кварцитов. М.: Недра, 1969. 240 с.
4. *Пирогов Б.И., Поротов Г.С., Холошин И.В., Тарасенко В.Н.* Технологическая минералогия железных руд. Л.: Наука, 1988. 302 с.
5. *Семененко Н.П., Половко Н.И., Жуков Г.В.* и др. Петрография железисто-кремнистых формаций Украинской ССР. Киев: Изд. АН УССР, 1956. 536 с.

SOME OBJECTIVE LAWS OF TECHNOLOGICAL MINERALOGY OF IRON ORES FROM HANNIVKA DEPOSIT (KRYVYI RIH BASIN)

S. Karpenko, V. Yevtyehov, A. Yevtyehova

*Kryvyi Rih Technical University
Pushkin St. 44, UA – 50002 Kryvyi Rih, Ukraine
E-mail: evtekhov@mail.ru*

The results of mineralogical, chemical composition and indexes of concentration of the deposit magnetite ores researches are presented (Hannivka deposit, Kryvyi Rih basin). It is set that it is close correlation between main mineralogical, chemical components of ores and quality, yield of iron ore concentrate, iron recovery in the concentrate and losses of iron in the waste of concentration. The necessity of the detailed mineralogical and technological researches conducting of ores is marked for the increase of efficiency of their use.

Key words: banded iron formation, magnetite ores, mineral composition, chemical composition, iron ores concentration, Kryvyj Rih basin.

**НЕКОТОРЫЕ ЗАКОНОМЕРНОСТИ
ТЕХНОЛОГИЧЕСКОЙ МИНЕРАЛОГИИ ЖЕЛЕЗНЫХ РУД
АННОВСКОГО МЕСТОРОЖДЕНИЯ КРИВБАССА**

С. Карпенко, В. Евтехов, А. Евтехова

*Криворожский технический университет
50002 г. Кривой Рог, ул. Пушкина, 44
E-mail: evtekhov@mail.ru*

Приведены результаты исследования минерального, химического состава и показателей обогащения магнетитовых руд Анновского месторождения (Кривбасс). Установлено, что между основными минералогическими, химическими компонентами руд и качеством, выходом железорудного концентрата, изъятием в концентрат железа и потерями железа в отходах обогащения существует тесная корреляционная связь. Отмечена необходимость проведения детальных минералого-технологических исследований руд для повышения эффективности их использования.

Ключевые слова: железисто-кремнистая формация, магнетитовые руды, минеральный состав, химический состав, обогащение руд, Криворожский бассейн.

Стаття надійшла до редколегії 09.06.2009

Прийнята до друку 15.09.2009