

# ИСПОЛЬЗОВАНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ ФАЗОВОГО СОСТАВА МАГНЕТИТОВОЙ РУДЫ ДЛЯ ПРОГНОЗИРОВАНИЯ ВЫХОДА КОНЦЕНТРАТА

А.Е. Пелевин

Уральский государственный горный университет, Екатеринбург, Россия

**Аннотация:** Целью выполненных исследований явилась разработка математической модели для расчёта выхода магнетитового концентрата с заданным качеством и расчёта массовой доли железа в хвостах обогащения по данным фазового состава исходной руды по железу. Прогнозирование выхода концентрата с заданным качеством возможно с использованием теоретических и экспериментальных моделей. Прогнозируемые значения массовых долей железа общего и магнетитового в хвостах обогащения рассчитаны по уравнениям технологического баланса с использованием теоретических значений выхода концентрата. Аналитическая модель для расчёта выхода концентрата включает сумму двух составляющих. Первая составляющая характеризуется извлечением в концентрат магнитной фазы железа. Вторая составляющая характеризуется извлечением в концентрат немагнитной фазы железа. Значения отдельных факторов, входящих в аналитическую модель, определяются с высокими погрешностями. Поэтому аналитическая модель была заменена регрессионной моделью, включающей экспериментальные коэффициенты и два фактора. В качестве факторов использованы массовые доли железа общего и магнетитового в руде. Абсолютная максимальная ошибка предсказания выхода концентрата составила  $\pm 0,31\%$  при  $P = 95\%$ . Математическая модель позволяет осуществлять планирование массовых долей железа общего и магнетитового в руде с целью получения требуемого выхода концентрата и для выявления причин снижения выхода концентрата или увеличения массовой доли железа в хвостах обогащения.

**Ключевые слова:** математическая модель, магнетитовая руда, фазовый состав, выход концентрата, извлечение железа в концентрат, массовая доля железа, массовая доля железа магнетитового, хвосты обогащения.

**Для цитирования:** Пелевин А. Е. Использование результатов фазового состава магнетитовой руды для прогнозирования выхода концентрата // Горный информационно-аналитический бюллетень. – 2022. – № 5–1. – С. 131–144. DOI: 10.25018/0236\_1493\_2022\_51\_0\_131.

## Using the results of the phase composition of magnetite ore for prediction of the concentrate yield

A. E. Pelevin

Ural State Mining University, Ekaterinburg, Russia

**Abstract:** The purpose of the research was the development of a mathematical model for calculating the yield of magnetite concentrate with a given quality and calculating the mass

fraction of iron in the tailings according to the phase composition of the original ore for iron. Predicting of the yield of concentrate with a given quality is possible using theoretical and experimental models. The predicted values of the mass fractions of total and magnetite iron in the tailings are calculated according to the equations of the technological balance with using the theoretical values of the concentrate yield. The analytical model for calculating the concentrate yield includes the sum of two components. The first component is characterized by the recovery of the magnetic phase of iron into the concentrate. The second component is characterized by the recovery of the non-magnetic phase of iron into the concentrate. The values of individual factors included in the analytical model are determined with high errors. Therefore, the analytical model was replaced by a regression model that includes experimental coefficients and two factors. The factors used were the mass fractions of total and magnetite iron in the ore. The absolute maximum error of prediction of the concentrate yield was  $\pm 0.31\%$  at  $P = 95\%$ . The mathematical model allows planning the mass fractions of total iron and magnetite in the ore in order to obtain the required concentrate yield and to identify the reasons for the decrease of the concentrate yield or an increase in the mass fraction of iron in the tailings.

**Key words:** mathematical model, magnetite ore, phase composition, concentrate yield, extraction of iron into concentrate, mass fraction of iron, mass fraction of magnetite iron, tailings.

**For citation:** Pelevin A.E. Using the results of the phase composition of magnetite ore for prediction of the concentrate yield. *MIAB. Mining Inf. Anal. Bull.* 2022;(5–1):131–144. [In Russ]. DOI: 10.25018/0236\_1493\_2022\_51\_0\_131.

---

## Введение

Схемы обогащения магнетитовых руд являются однотипными и включают стадийное измельчение и магнитное обогащение с выводом хвостов после каждой стадии измельчения. Повышение эффективности обогащения железных руд в основном связано с применением технологий и оборудования, позволяющих увеличить извлечение железа в концентрат и выход концентрата или повысить его качество. К первым технологиям можно отнести использование гидравлических грохотов в замкнутом цикле измельчения [1, 2], применение сепараторов с повышенной напряжённостью магнитного поля [3–5], стадийное выделение концентрата [6, 7]. Ко вторым технологиям относятся методы повышения качества рядового концентрата (флотационный, магнитный в аппаратах специальных конструкций, тонкое грохочение) [8–13]. Также применяются технико-

технологические решения, связанные с оптимизацией требуемой крупности при измельчении руды [14–18], приводящие к снижению энергозатрат.

Другим, не менее важным показателем эффективности работы железорудного предприятия, является стабильное производство концентрата с заданным качеством при плановом количестве. Для этого необходимо не только стабилизировать состав рудной шихты, подаваемой на обогатительную фабрику по общему железу, но и осуществить стабилизацию фазового состава руды по железу магнетитовому и немагнитному (силикатному, гематитовому и другому). Это приведёт к повышению эффективности последующего металлургического передела.

Проблему стабилизации фазового состава рудной шихты по железу нельзя полностью решить с помощью усреднения. Необходимо оптимизировать систему геолого-технологиче-

ского картирования месторождения и технологию горных работ. При геолого-технологическом картировании магнетитовых месторождений применяется магнитный анализ с определением показателя обогатимости руды, в качестве которого в основном используется массовая доля железа в магнитной фракции трубчатого анализатора. На основании этого показателя выполняется планирование состава рудной шихты, подаваемой на обогатительную фабрику. Такой подход к планированию технологии добычи руды можно признать правильным, так как в целом он обеспечивает стабилизацию качества производимого концентрата.

При геолого-технологическом картировании магнетитовых месторождений в керновых пробах руды определяются массовые доли железа общего и магнетитового, то есть имеется основной фазовый состав железа (железо магнетитовое и немагнитное). Соотношение величин массовых долей железа общего и магнетитового оказывает существенное влияние на значения выхода концентрата и массовой доли железа в хвостах обогащения. Снижение отношения  $Fe_{\text{магн}}/Fe$  в руде может не привести к снижению массовой доли железа в концентрате, но всегда приведёт к уменьшению выхода концентрата и к повышению массовой доли железа в хвостах обогащения. Исходя из этого, данные геолого-технологического картирования месторождения используются не полностью. Применение фазового состава руды по железу при планировании состава рудной шихты позволит исключить возможность незапланированного снижения выхода концентрата и увеличения массовой доли железа в хвостах обогащения, что приведёт к повышению эффективности работы предприятия.

Целью выполненных исследований явилась разработка математической модели для расчёта выхода концентрата с заданным качеством и расчёта массовой доли железа в хвостах обогащения по данным фазового состава исходной руды по железу.

### **Методики исследований и характеристики исходных данных**

Модель выхода концентрата апробирована в основном к титаномагнетитовой руде Гусевогорского месторождения, характеризующейся наличием одного промышленного минерала железа — титаномагнетита. Оценка применимости теоретической модели для прогноза выхода концентрата выполнена путём сравнения с промышленными результатами. Использованы суточные показатели работы обогатительной фабрики Качканарского ГОКа.

В работе применялись теоретические и экспериментальные методы получения моделей для прогнозирования выхода концентрата с заданным качеством. Средняя массовая доля железа в концентрате за исследуемый период работы обогатительной фабрики Качканарского ГОКа составила 61,88% (суммарный концентрат для агломерации и окомкования) при коэффициенте вариации 0,34% и диапазоне варьирования 61,46—62,30%. Диапазон варьирования массовой доли железа в суммарном концентрате достаточно низкий, учитывая, что фабрика производит два концентрата с разными массовыми долями железа (61% — для агломерации и 62,3% — для окомкования). Это позволило принять постоянную массовую долю железа в суммарном концентрате, равную 61,88%.

Прогнозируемые значения массовых долей железа общего и магнетитового в хвостах обогащения рассчитаны по уравнениям технологического

баланса с использованием теоретических значений выхода концентрата. Также использованы экспериментальные данные фазового состава по железу исходной руды и экспериментальные данные массовых долей железа общего и магнетитового в концентрате.

Дополнительно выполнена предварительная оценка возможности применения теоретической модели для железистых кварцитов Сутарского месторождения, характеризующихся наличием двух промышленных минералов железа — магнетита и гематита. Оценка применимости теоретической модели выполнена путём сравнения с лабораторными результатами. Используются результаты лабораторного обогащения по трёхстадиальной схеме измельчения и мокрой магнитной сепарации проб природных типов и разновидностей руды и предполагаемой рудной шихты.

Математическая модель для расчёта выхода концентрата по фазовому составу руды

Железо, содержащееся в магнетитовой руде, представлено двумя основными фазами: магнетитовое железо (извлекаемая в слабом магнитном поле в концентрат фаза, представленная преимущественно магнетитом) и немагнитное железо (попутно извлекаемая в слабом магнитном поле в концентрат фаза, представленная слабомагнитными минералами). При получении магнетитового (титаномагнетитового) концентрата немагнитное железо остаётся в породных минералах. Извлечение рудных слабомагнитных минералов железа (гематита и ильменита) для рассматриваемых месторождений (Сутарского и Гусевогорского) экономически нецелесообразно. Массовые доли этих двух фаз в руде известны до начала обогащения руды. Их значения используются для составления

месячного плана качественных характеристик добываемой руды и используются технологами при последующем обогащении.

Основными задачами обогащения магнетитовых руд являются обеспечение максимального извлечения в концентрат магнитной фазы (магнетитового железа) и минимального извлечения в концентрат немагнитной фазы (немагнитного железа, связанного с породными минералами и некоторыми рудными минералами). При этом извлечение гематита (немагнитной фазы) в магнетитовый концентрат приводит к положительному эффекту, а извлечение ильменита в титаномагнетитовый концентрат приводит к отрицательному эффекту.

Принципиальную модель выхода концентрата при известных значениях массовых долей  $Fe_{\text{магн}}$  и  $Fe_{\text{нем}}$  в руде в общем виде можно записать следующим образом:

$$\gamma_{\text{к}} = \gamma_{\text{км}} + \gamma_{\text{кн}}, \quad (1)$$

где  $\gamma_{\text{км}}$  и  $\gamma_{\text{кн}}$  — составляющие выхода концентрата, связанные с попаданием в концентрат магнитной фазы (титаномагнетит, магнетит) и немагнитной фазы (породные минералы, ильменит, гематит), содержащих железо, %.

Составляющие модели (1) определяются по общей формуле:

$$\gamma_{\text{кф}} = \frac{\varepsilon_{\text{кф}} \alpha_{\text{ф}}}{\beta_{\text{ф}}}, \quad (2)$$

где  $\gamma_{\text{кф}}$  и  $\varepsilon_{\text{кф}}$  — выход концентрата и извлечение железа в него, связанные с основными фазами железа в руде, %;  $\alpha_{\text{ф}}$  и  $\beta_{\text{ф}}$  — массовая доля фазы железа в руде и в концентрате, %.

Исходя из уравнений (1)–(2), аналитическая модель для прогноза выхода концентрата будет иметь следующий вид:

$$\gamma_{\text{кф}} = \frac{\varepsilon_{\text{км}} \alpha_{\text{м}}}{\beta_{\text{м}}} - \frac{\varepsilon_{\text{кн}} (\alpha - \alpha_{\text{м}})}{\beta_{\text{н}}}, \quad (3)$$

где  $\varepsilon_{\text{км}}$  и  $\varepsilon_{\text{кн}}$  — извлечение в концентрат магнетитового и немагнитного железа, %;  $\beta_{\text{м}}$  и  $\beta_{\text{н}}$  — массовые доли железа магнетитового и немагнитного в концентрате, %;  $\alpha_{\text{м}}$  и  $\alpha$  — массовые доли железа магнетитового и общего в исходной руде, %.

Для промышленного предприятия массовая доля железа в концентрате должна иметь постоянное значение. Поэтому на выход концентрата в основном будут влиять массовые доли железа магнетитового ( $\alpha_{\text{м}}$ ) и железа немагнитного ( $\alpha_{\text{н}} = \alpha - \alpha_{\text{м}}$ ) в руде.

Значения массовых долей железа магнетитового в продуктах обогащения железистых кварцитов определяются по ГОСТ 16589—86. Абсолютные погрешности достаточно высокие (0,9% и более). Для титаномагнетитовых руд, концентратов и хвостов обогащения ГОСТ отсутствует, но методики имеются и применяются. Поэтому на железообогатительных предприятиях величины массовых долей железа магнетитового в руде и в хвостах обогащения в основном определяются и контролируются только для оценки качества добытой руды и для оценки эффективности работы обогатительной фабрики. Для оперативного получения информации в основном применяются магнитометрические методы. При этом массовая доля железа магнетитового в руде и хвостах обогащения не используется для составления технологического (в связи с большими погрешностями) и товарного балансов. Поэтому эти величины являются лишь контролируемыми показателями в рамках отдельного промышленного предприятия для оценки эффективности своей работы.

Учитывая сложность и высокие погрешности определения величин

$\beta_{\text{м}}$ ,  $\beta_{\text{н}}$ ,  $\varepsilon_{\text{км}}$  и  $\varepsilon_{\text{кн}}$ , можно отношения  $\varepsilon_{\text{км}}/\beta_{\text{м}}$  и  $\varepsilon_{\text{кн}}/\beta_{\text{н}}$  в аналитической модели (3) представить как коэффициенты множественной линейной модели. Тогда модель (3) примет вид:

$$\gamma_{\text{к}} = A_{\text{м}} \alpha_{\text{м}} + A_{\text{н}} (\alpha - \alpha_{\text{м}}), \quad (4)$$

где  $A_{\text{м}} = \varepsilon_{\text{км}}/\beta_{\text{м}}$  и  $A_{\text{н}} = \varepsilon_{\text{кн}}/\beta_{\text{н}}$  — коэффициенты регрессионной модели.

Коэффициенты регрессионной модели  $A_{\text{м}}$  и  $A_{\text{н}}$  можно определить методом наименьших квадратов по суточным экспериментальным показателям работы обогатительной фабрики (выход концентрата, массовые доли железа общего и магнетитового в руде).

Модель разработана для стандартной схемы и принципиально применима для любого типа магнетитовой руды. Если используются технологии, позволяющие повысить выход концентрата без снижения массовой доли железа в нём [1—7] или технологии для повышения качества концентрата [8—13], то модель требует уточнения, так как в первом случае выход концентрата по сравнению со стандартной схемой повысится, а во втором случае — понизится. В любом случае, коэффициенты регрессионной модели (4) требуют уточнения раз в месяц с использованием вновь полученных суточных данных.

Результаты прогнозирования показателей обогащения по фазовому составу титаномагнетитовой руды (данные промышленного опробования, руда Гусевогорского месторождения)

Регрессионный и корреляционный анализ выполнен с использованием 304 средних суточных показателей работы обогатительной фабрики Качканарского ГОКа. Суточные показатели определяются на фабрике путём расчёта среднего значения по результатам анализа 12 проб. В результате расчётов получена регрессионная модель вида:

$$\gamma_k = 1,5742 \cdot \alpha_m + 0,1987 \cdot (\alpha - \alpha_m). \quad (5)$$

Коэффициент множественной линейной корреляции и корреляционное отношение составили 0,99. Абсолютная максимальная ошибка предсказания выхода концентрата составила  $\pm 0,31\%$  при  $P=95\%$  (максимальная относительная ошибка при среднем выходе концентрата 16,94% составила  $\pm 1,83\%$  отн. при  $P=95\%$ ). Средние значения выхода концентрата и массовых долей Fe и Fe<sub>магн</sub> в хвостах по экспериментальным (промышленным) и теоретическим данным составили: 16,942 и 16,943; 6,269 и 6,268; 0,544 и 0,543%. Это говорит о высокой точности полученной модели (5) и о возможности её использования для прогнозирования выхода концентрата по результатам фазового состава по железу титаномагнетитовой руды.

В табл. 1 приведены основные показатели обогащения, полученные

по разработанной модели. Диапазоны изменения показателей руды приняты исходя из колебаний массовой железа общего (15,05 – 16,82%) и отношения Fe<sub>магн</sub>/Fe (0,61 – 0,70) в руде за исследуемый период. Выход концентрата рассчитан по модели (5). Величины массовых долей железа общего и магнетитового в хвостах обогащения рассчитаны по уравнениям технологического баланса с использованием теоретических значений выхода концентрата и постоянных (средних) экспериментальных значений массовых долей железа общего и (61,88%) магнетитового (56,66%) в концентрате.

На рис. 1 приведены зависимости выхода концентрата и массовых долей Fe и Fe<sub>магн</sub> в хвостах обогащения от массовой доли Fe и от отношения Fe<sub>магн</sub>/Fe в руде. При увеличении массовой доли Fe в руде (при одинаковых значениях Fe<sub>магн</sub>/Fe в руде) повышаются выход концентрата и массовые

Таблица 1

**Теоретические показатели обогащения титаномагнетитовой руды**  
**Theoretical indicators of the mineral dressing of the titanomagnetite ore**

Руда		Fe <sub>магн</sub> / Fe	Концентрат		Хвосты		
Массовая доля, %	Fe		Fe <sub>магн</sub>	Выход, %	Массовая доля Fe, %	Массовая доля, %	
						Fe	Fe <sub>магн</sub>
15,0	9,00	0,60	15,36	61,88	6,49	0,35	
	9,75	0,65	16,39		5,81	0,55	
	10,50	0,70	17,42		5,11	0,76	
15,5	9,30	0,60	15,87		6,75	0,36	
	10,08	0,65	16,94		6,04	0,57	
	10,85	0,70	18,00		5,32	0,79	
16,0	9,60	0,60	16,38		7,01	0,38	
	10,40	0,65	17,48		6,28	0,60	
	11,20	0,70	18,59		5,53	0,82	
16,5	9,90	0,60	16,90		7,27	0,39	
	10,73	0,65	18,03		6,52	0,62	
	11,55	0,70	19,17		5,74	0,85	
17,0	10,20	0,60	17,41		7,54	0,41	
	11,05	0,65	18,58		6,76	0,64	
	11,90	0,70	19,75		5,96	0,89	

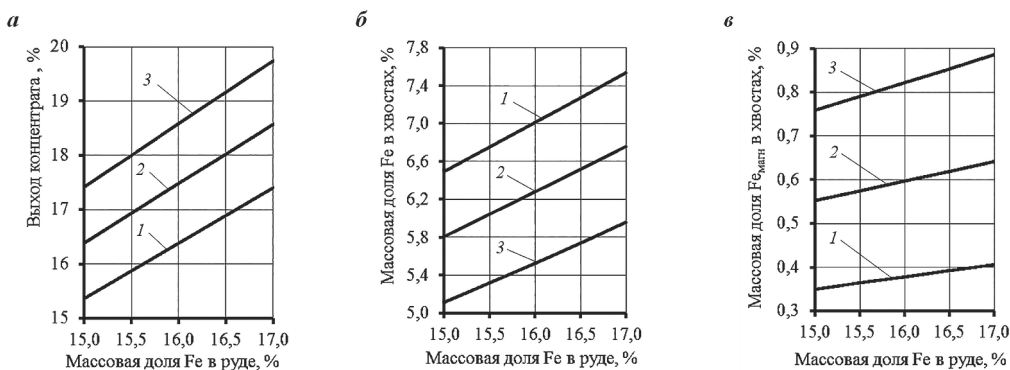


Рис. 1. Зависимость выхода концентрата (а) и массовых долей Fe (б) и  $Fe_{\text{магн}}$  (в) в хвостах обогащения от массовой доли Fe в руде: 1, 2 и 3 – отношение  $Fe_{\text{магн}}/Fe$  в руде равно 0,60; 0,65; 0,70 соответственно

Fig. 1. Dependence of the concentrate yield (a) and the mass fractions of iron (b) and magnetic iron (c) in the tailings on the mass fraction of iron in the ore: 1, 2 and 3 – the ratio  $Fe_{\text{магн}}/Fe$  in the ore is 0.60; 0.65; 0.70

доли железа Fe и  $Fe_{\text{магн}}$  в хвостах обогащения.

Однако возможен вариант, когда при обогащении бедной руды (15% Fe) выход концентрата может быть выше (17,42%), чем выход концентрата (16,9%) при обогащении богатой руды (16,5% Fe). Это связано с повышенным отношением  $Fe_{\text{магн}}/Fe$  для бедной руды (0,7) по сравнению с богатой рудой (0,6). Поэтому на выход концентрата основное влияние оказывает массовая доля  $Fe_{\text{магн}}$  в руде. Это объясняет «неожиданное» снижение планируемого выхода концентрата при обогащении богатой по железу руды по сравнению с бедной рудой. Такое явление возникает в случае уменьшения массовой доли  $Fe_{\text{магн}}$  и  $Fe_{\text{магн}}/Fe$  в руде (см. табл. 1, рис. 1, а).

На величины массовых долей Fe и  $Fe_{\text{магн}}$  в хвостах обогащения также существенное влияние оказывают массовые доли Fe и  $Fe_{\text{магн}}$  в руде и отношение  $Fe_{\text{магн}}/Fe$  в руде. При снижении отношения в руде  $Fe_{\text{магн}}/Fe$  (снижении  $Fe_{\text{магн}}$  в руде) при одинаковой массовой доле железа в руде всегда произойдёт

увеличение железа общего в хвостах обогащения (см. табл. 1, рис. 1, б). Массовая доля железа магнетитового в хвостах обогащения при одинаковой массовой доле железа в руде, наоборот, будет снижаться при уменьшении  $Fe_{\text{магн}}$  в руде и отношения  $Fe_{\text{магн}}/Fe$  в руде (см. табл. 1, рис. 1, в).

Следует отметить, что расчёт массовых долей Fe и  $Fe_{\text{магн}}$  в хвостах обогащения по фазовому составу руды по железу имеет большую погрешность по сравнению с прогнозированием выхода концентрата. Это связано с использованием уравнений технологического баланса при постоянных величинах массовых долей железа общего (61,88%) и магнетитового (56,66) в концентрате. Однако полученные зависимости (см. рис. 1, б и в) отражают общую тенденцию изменения Fe и  $Fe_{\text{магн}}$  в хвостах обогащения в зависимости от фазового состава руды по железу. Поэтому разработанная модель позволяет прогнозировать изменение массовых долей Fe и  $Fe_{\text{магн}}$  в хвостах обогащения в зависимости от фазового состава руды и объяснять

«неожиданное» повышение этих показателей.

**Результаты прогнозирования показателей обогащения по фазовому составу железистых кварцитов (Сутарское месторождение, лабораторные испытания)**

Предварительная оценка применимости модели для прогноза выхода концентрата и массовой доли железа в хвостах обогащения для железистых кварцитов выполнена по результатам лабораторных исследований (табл. 2).

Полученная регрессионная модель имеет вид:

$$\gamma_k = 1,5515 \cdot \alpha_m + 0,0206 \cdot (\alpha - \alpha_m). \quad (6)$$

Коэффициент множественной линейной корреляции составил 0,99. Корреляционное отношение составило 0,86. Абсолютная максимальная ошибка предсказания выхода концентрата составила  $\pm 3,54\%$  при  $P=95\%$  (максимальная относительная ошибка при среднем выходе концентрата 26,49% составила  $\pm 13,38\%$

отн. при  $P=95\%$ ). Средние значения выхода концентрата и массовых долей Fe в хвостах по экспериментальным (лабораторным) и теоретическим данным составили: 26,49 и 26,47; 20,37 и 20,25%.

Ошибки предсказания выхода концентрата по модели достаточно высокие, несмотря на использование данных, полученных в лабораторных условиях. Это связано с высоким колебанием массовой доли железа в концентратах (65,43 – 68,36%), полученных при раздельном обогащении минеральных разновидностей железистых кварцитов. Также на высокую погрешность повлияли значительные колебания  $Fe_{\text{магн}}/Fe$  (0,25 – 0,82) в пробах минеральных разновидностей, что не характерно при обогащении реальной руды (см. табл. 2).

Высокая ошибка предсказания выхода концентрата по модели (4), полученной по результатам обогащения проб железистых кварцитов, во многом связана с различным соотношением рудных и породных минералов в разновидностях проб руды, а также

*Таблица 2*  
**Показатели обогащения железистых кварцитов**  
*Indicators of the mineral dressing of ferruginous quartzites*

Руда		Fe <sub>магн</sub> / Fe	Концентрат		Массовая доля Fe в хвостах, %
Массовая доля, %	Fe <sub>магн</sub>		Выход, %	Массовая доля Fe, %	
Fe		Fe <sub>магн</sub>			
Магнетитовый тип, силикат-магнетитовая разновидность					
33,70	27,60	0,82	41,28	66,87	10,38
Магнетитовый тип, силикат-гематит-магнетитовая разновидность					
33,00	20,20	0,61	34,49	66,60	15,31
Гематитовый тип, магнетит-гематитовая разновидность					
35,30	14,10	0,40	21,16	67,30	26,71
Гематитовый тип, гематит-мартитовая разновидность					
35,10	10,90	0,31	17,30	68,36	28,14
Карбонатно-силикатные породы					
29,00	7,30	0,25	11,61	67,99	23,88
Предполагаемая шихта из минеральных разновидностей руды					
33,57	20,96	0,62	33,08	65,43	17,82



с размером зёрен рудных минералов и с соотношением магнетита, гематита и мартита в пробах руды. Если в руде кроме магнетита содержится значительное количество гематита и мартита, которые принципиально можно выделить во второй (гематитовый) концентрат [19–23], ошибка прогнозирования выхода концентрата по модели (4) должна увеличиться. Это связано с возможностью попадания гематита и мартита, имеющих слабомагнитные свойства [24, 25], в магнетитовый концентрат, что приведёт к завышению выхода магнетитового концентрата.

На рис. 2 приведены результаты сравнений экспериментального выхода концентрата с теоретическим выходом концентрата и экспериментальной массовой доли Fe в хвостах с теоретической массовой долей Fe в хвостах, представленные в виде зависимостей  $Y = A \cdot X$ , где  $Y$  — экспериментальное значение;  $X$  — теоретическое значение. Выход концентрата рассчитан по модели (6).

Массовые доли железа в хвостах обогащения рассчитаны по уравнениям технологического баланса с использованием теоретических значений выхода концентрата и постоянного (среднего) экспериментального значения массовой доли железа (67,09%) в концентрате.

Угловые коэффициенты обеих зависимостей  $Y = A \cdot X$  и коэффициенты детерминации приближаются к единице (см. рис. 2). Это говорит о возможности применения простых регрессионных моделей для прогнозирования выхода концентрата и массовой доли железа в хвостах с помощью фазового состава по железу для железистых кварцитов.

Следует отметить, что использование суточных (усреднённых) данных промышленного предприятия при стабилизации во времени соотношения минеральных разновидностей в рудной шихте приведёт к снижению ошибки прогнозирования выхода концентрата при обогащении железистых кварцитов.

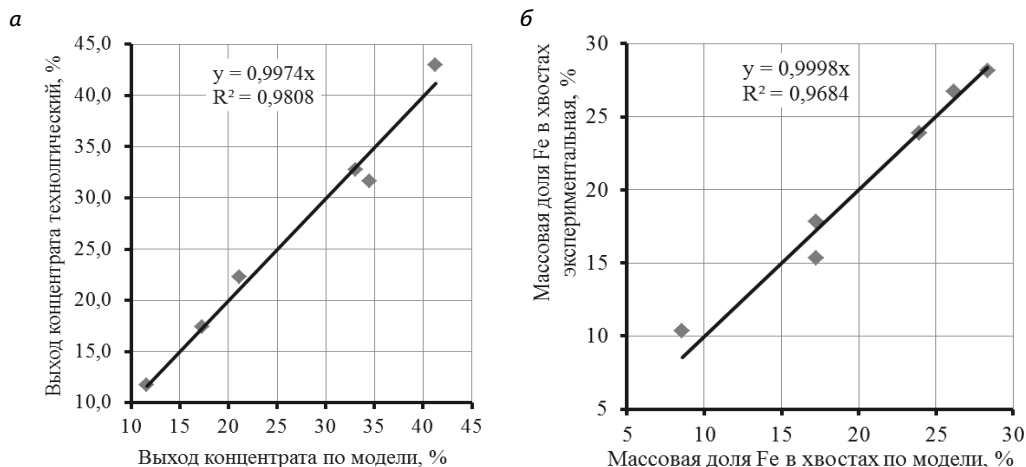


Рис. 2. Результаты сравнений экспериментального выхода концентрата с теоретическим выходом концентрата (а) и экспериментальной массовой доли Fe в хвостах с теоретической массовой долей Fe в хвостах (б)

Fig. 2. Results of comparisons of the concentrate experimental yield on the concentrate theoretical yield (a) and the experimental mass fraction of iron in the tailings on the theoretical mass fraction of iron in the tailings (b)

Обсуждение применимости модели для прогнозирования выхода концентрата и массовой доли железа в хвостах обогащения

Разработанную математическую модель принципиально можно использовать для прогнозирования выхода концентрата и массовой доли железа в хвостах обогащения. Об этом говорят незначительные ошибки при расчетах по модели, полученной для руды Гусевогорского месторождения с использованием 304 средних суточных данных, рассчитанных по результатам 12 отдельных опробований.

Модель получена с использованием фазового состава руды (по данным опробования мелкодроблёной руды) и технологических показателей работы обогатительной фабрики. На практике планируемый фазовый состав руды по железу, получаемый с помощью геолого-технологического картирования, не всегда совпадает с фазовым составом руды, поступившей на фабрику в отдельные промежутки времени. Причины этого явления в настоящей статье не рассматриваются. Но это часто происходит на промышленном предприятии и может приводить к незапланированному снижению выхода концентрата и к повышению массовой доли железа в хвостах обогащения.

Использование суточных запланированных геологических данных с фазовым составом руды и суточных, фактически полученных на обогатительной фабрике значений технологического выхода концентрата, не позволило получить модель с низкой ошибкой. Поэтому модель с использованием геологических данных можно применять только для продолжительного промежутка времени (декада, месяц).

Разработанная модель может получить практическое применение при объяснении возможной причины

незапланированного суточного уменьшения выхода концентрата и увеличения массовой доли железа в хвостах обогащения, связанной с изменением фазового состава руды, поступившей на обогатительную фабрику (см. рис. 1).

Математическая модель (3) справедлива при постоянной величине массовой доли железа в концентрате. Если на предприятии происходят значительные колебания массовой доли железа в концентрате, то ошибки прогноза по модели возрастут. В этом случае модель можно использовать только для определения тенденции изменения выхода концентрата при колебаниях фазового состава руды по железу. Ошибки прогноза массовых долей Fe и Fe<sub>магн</sub> в хвостах обогащения будут всегда выше ошибки прогноза выхода концентрата, однако влияние изменения фазового состава руды по железу на значения массовых долей Fe и Fe<sub>магн</sub> в хвостах определить можно.

### Выводы

1. Разработанная математическая модель может быть использована при планировании фазового состава магнетитовой руды для получения требуемого выхода концентрата в среднем за месяц (при использовании геологических данных) и для выявления причин незапланированного снижения выхода концентрата или увеличения массовой доли железа в хвостах обогащения за сутки (при использовании данных обогатительной фабрики).

2. Увеличение массовой доли железа в руде не всегда приводит к повышению технологических показателей работы обогатительной фабрики. Снижение отношения Fe<sub>магн</sub>/Fe в руде при постоянной массовой доле Fe в руде приведёт к уменьшению выхода концентрата и массовой доли Fe<sub>магн</sub> в хвостах. Это

будет сопровождаться повышением массовой доли железа общего в хвостах.

3. Для повышения эффективности работы железорудного предприятия необходимо стабилизировать состав рудной шихты, подаваемой на обогатительную фабрику, не только по общему

железу, но и по железу магнетитовому и немагнитному. Это позволит ритмично получать требуемое количество концентрата при стабильном его качестве, что приведёт к повышению эффективности последующего металлургического передела.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Вайсберг Л. А., Коровников А. Н., Трофимов В. А.* Модернизация технологических циклов грохочения на основе инновационного оборудования (к 100-летию института «Механобр») // Горный журнал. — 2017. — № 1. — С. 11–17. DOI: 10.17580/gzh.2017.01.02.

2. *Palaniandy S., Halomoan R., Ishikawa H.* TowerMill circuit performance in the magnetite grinding circuit — The multi-component approach // Minerals Engineering. 2019, vol. 133, pp. 10–18. DOI:10.1016/j.mineng.2018.12.019.

3. *Пелевин А. Е., Сытых Н. А.* Применение сепараторов с повышенной индукцией магнитного поля при обогащении титаномагнетитовой руды // Обогащение руд. — 2020. — № 2. — С. 15–20. DOI: 10.17580/or.2020.02.03.

4. *Пелевин А. Е., Цыпин Е. Ф., Колтунов А. В., Комлев С. Г.* Высокоинтенсивные магнитные сепараторы с постоянными магнитами // Известия вузов. Горный журнал. — 2001. — № 4–5. — С. 133–136.

5. *Вайсберг Л. А., Дмитриев С. В., Мезенин А. О.* Управляемые магнитные аномалии в технологиях переработки минерального сырья // Горный журнал. — 2017. — № 10. — С. 26–32. DOI: 10.17580/gzh.2017.10.06.

6. *Пелевин А. Е., Сытых Н. А.* Применение тонкого гидравлического грохочения для стадийного выделения концентрата // Обогащение руд. — 2021. — № 1. — С. 8–14. DOI: 10.17580/or.2021.01.02.

7. *Опалев А. С., Бирюков В. В., Щербаков А. В.* Стадийное выделение магнетитового концентрата при разработке энергоресурсосберегающей технологии обогащения железистых кварцитов на ОАО «Олкон» // Горный информационно-аналитический бюллетень. — 2015. — № 11. — С. 60–62.

8. *Pattanaik A., Rayasam V.* Analysis of reverse cationic iron ore fines flotation using RSM-D-optimal design — An approach towards sustainability // Advanced Powder Technology. 2018, vol. 29, is. 12. pp. 3404–3414. DOI:10.1016/j.appt.2018.09.021.

9. *Veloso C. H., L. O. Filippov I. V. Filippova S. Ouvrard A. C. Araujo.* Investigation of the interaction mechanism of depressants in the reverse cationic flotation of complex iron ores // Minerals Engineering. 2018, vol. 125, pp. 133–139. DOI: 10.1016/j.mineng.2018.05.031.

10. *Matiolo E., Couto H. J. B., Lima N., Silva K., Freitas A. S.* Improving recovery of iron using column flotation of iron ore slimes // Minerals Engineering. 2020, vol. 158, 106608. DOI: 10.1016/j.mineng.2020.106608.

11. *Немыкин С. А., Копанев С. Н., Мезенцева Е. В., Окунев С. М.* Производство железорудного концентрата с повышенной долей полезного компонента // Горный журнал. — 2017. — № 5. — С. 27–31. DOI: 10.17580/gzh.2017.05.05.

12. *Исмагилов Р. И., Козуб А. В., Гридасов И. Н., Шелепов Э. В.* Современные направления повышения эффективности переработки железистых кварцитов на примере АО «Михайловский ГОК им. А. В. Варичева» // Горная промышленность. — 2020, — № 4. — С. 98–103. DOI: 10.30686/1609-9192-2020-4-98-103.

13. *Опалев А. С., Хохуля М. С., Фомин А. В., Карпов И. В.* Создание инновационных технологий производства высококачественного железосодержащего концентрата на предприятиях северо-запада России // Горный журнал. — 2019. — № 6. — С. 56–60. DOI: 10.17580/gzh.2019.06.17.

14. *Морозов В. В., Топчаев В. П., Улитенко К. Я., Ганбаатар З., Дэлгэрбат Л.* Разработка и применение автоматизированных систем управления процессами обогащения полезных ископаемых. — М.: Руда и металлы, 2013. — 512 с.

15. *Пелевин А. Е.* Влияние магнитной флокуляции на результаты обогащения железосодержащих руд // Обогащение руд. — 2021. — № 4. — С. 15–20. DOI: 10.17580/or.2021.04.03.

16. *Эрдэнэзул Ж., Морозов В. В.,* Оптимизация крупности измельчения медно-молибденовых руд с использованием модельориентированных критериев // Горный информационно-аналитический бюллетень. — 2018. — № 8. — С. 176–183. DOI: 10.25018/0236–1493–2018–8–0–176–183.

17. *Осипова Н. В.* Выбор параметров алгоритма управления загрузкой мельницы мокрого самоизмельчения железной руды // Горный информационно-аналитический бюллетень. — 2021. — № 10. — С. 146–156. DOI: 10.25018/0236\_1493\_2021\_10\_0\_146.

18. *Мелехина К. А., Ананьев П. П., Плотникова А. В., Тимофеев А. С., Шестак С. А.* Моделирование и оптимизация процесса рудоподготовки комплексных руд при их дезинтеграции в мельнице самоизмельчения // Горный информационно-аналитический бюллетень. — 2020. — № 10. — С. 95–105. DOI: 10.25018/0236–1493–2020–10–0–95–105.

19. *Kuskov V.B., Lvov V.V., Yushina T.I.* Increasing the recovery ratio of iron ores in the course of preparation and processing // CIS Iron and Steel Review. 2021, vol. 21, no 1, pp. 4–8. DOI: 10.17580/cisisr.2021.01.01.

20. *Пелевин А. Е.* Получение гематитового концентрата из гематит-магнетитовых руд // Горный информационно-аналитический бюллетень. — 2020. — № 3–1. — С. 422–430. DOI: 10.25018/0236–1493–2020–31–0–422–430.

21. *Tripathy S. K., Singh V, Murthy Y. R., Banerjee P. K., Suresh N.* Influence of process parameters of dry high intensity magnetic separators on separation of hematite // International Journal of Mineral Processing. 2017, vol. 160, pp. 16–31. DOI:10.1016/j.minpro.2017.01.007.

22. *Shrimali K., Atluri V., Wang Y., Bacchuwar S., Miller J. D.* The nature of hematite depression with corn starch in the reverse flotation of iron ore // Journal of Colloid and Interface Science. 2018, vol. 524, pp. 337–349. DOI: 10.1016/j.jcis.2018.04.002.

23. *Zhanglei Z., Zhen L., Wanzhong Y., Bin Y., Jinzhou Q., Ningning Z., Songjiang C., Yuexian Y., Jing C., Lijun L.* Snap-in interactions between water droplets and hematite/quartz surfaces with various roughness after conditioning with soluble starch and DDA using a dynamic microbalance // Minerals Engineering. 2022, vol. 177, 107358. DOI: 10.1016/j.mineng.2021.107358.

24. *Кармазин В. В., Кармазин В. И.* Магнитные, электрические и специальные методы обогащения полезных ископаемых. Т. 1. Магнитные и электрические методы обогащения полезных ископаемых. — М.: Горная книга, 2012. — 672 с.

25. *Дорошенко М. В., Башлыкова Т. В.* Технологические свойства минералов: справочник для технологов. — М.: Теплоэнергетик, 2007. — 296 с. **ПИАБ**

## REFERENCES

1. *Vaisberg L.A., Korovnikov A.N., Trofimov V.A.* Innovative re-equipment of screening circuits (to commemorate the 100th anniversary of the Mekhanobr Institute). *Gornyi Zhurnal*. 2017, no. 1, pp. 11–17. [In Russ]. DOI: 10.17580/gzh.2017.01.02. DOI: 10.17580/gzh.2017.01.02.

2. Palaniandy S., Halomoan R., Ishikawa H. TowerMill circuit performance in the magnetite grinding circuit The multi-component approach. *Minerals Engineering*. 2019, vol. 133, pp. 10–18. DOI:10.1016/j.mineng.2018.12.019.
3. Pelevin A. E., Sytykh N. A. Increased magnetic field induction separators in titanium magnetite ore processing. *Obogashchenie Rud.* 2020, no 2, pp. 15–20. [In Russ]. DOI: 10.17580/or.2020.02.03.
4. Pelevin A. E., Tsy-pin E. F., Koltunov A. V., Komlev S. G. High-intensity magnetic separators with permanent magnets. *Izvestiya Vysshikh Uchebnykh Zavedenii. Gornyi Zhurnal*. 2001, no. 4–5. pp. 133–136. [In Russ].
5. Vaisberg L. A., Dmitriev S. V., Mezenin A. O. Controllable magnetic anomalies in mineral processing technologies. *Gornyi Zhurnal*. 2017, no. 10. pp. 26–32. [In Russ]. DOI: 10.17580/gzh.2017.10.06.
6. Pelevin A. E., Sytykh N. A. Fine hydraulic screening for staged separation of titanium-magnetite concentrate. *Obogashchenie Rud.* 2021, no. 1, pp. 8–14. [In Russ]. DOI: 10.17580/or.2021.01.02.
7. Opalev A. S., Birukov V. V., Scherbakov A. V. Stadi-al obtaining of the magnetite concentrate during the development of power resource-saving technology of beneficiation of ferruginous quartzites on JSC «Olcon». *MIAB. Mining Inf. Anal. Bull.* 2015, no. 11, pp. 60–62. [In Russ].
8. Pattanaik A., Rayasam V. Analysis of reverse cationic iron ore fines flotation using RSM-D-optimal design An approach towards sustainability. *Advanced Powder Technology*. 2018, vol. 29, is. 12, pp. 3404–3414. DOI:10.1016/j.appt.2018.09.021.
9. Veloso C. H., Filippov L. O., Filippova I. V., Ouvreard S., Araujo A. C.. Investigation of the interaction mechanism of depressants in the reverse cationic flotation of complex iron ores. *Minerals Engineering*. 2018, vol. 125, pp. 133–139. DOI: 10.1016/j.mineng.2018.05.031.
10. Matiolo E., Couto H. J. B., Lima N., Silva K., Freitas A. S. Improving recovery of iron using column flotation of iron ore slimes. *Minerals Engineering*. 2020, vol. 158, 106608. DOI: 10.1016/j.mineng.2020.106608.
11. Nemykin S. A., Kopanev S. N., Mezentseva E. V., Okunev S. M. Iron concentrate production with the increased content of useful component. *Gornyi Zhurnal*. 2017, no. 5, pp. 27–31. [In Russ]. DOI: 10.17580/gzh.2017.05.05.
12. Ismagilov R. I., Kozub A. V., Gridasov I. N., Shelepov E. V. Advanced solutions applied by JSC Andrei Varichev Mikhailovsky GOK to improve ferruginous quartzite concentration performance. *Gornaya Promyshlennost'*. 2020, no. 4, pp. 98–103. [In Russ]. DOI: 10.30686/1609–9192–2020–4–98–103.
13. Opalev A. S., Khokhulya M. S., Fomin A. V., Karpov I. V. Creation of innovative technologies for production of high-quality iron concentrate production in the North West of Russia. *Gornyi Zhurnal*. 2019, no 6, pp. 56–61. [In Russ]. DOI: 10.17580/gzh.2019.06.07.
14. Morozov V. V., Topchaev V. P., Ulitenko K. Ya., Ganbaatar Z., Delgerbat L. *Razrabotka i primenenie avtomatizirovannykh sistem upravleniya processami obogashcheniya poleznykh iskopaemykh* [Development and application of automated control systems for mineral processing]. Moscow, Ruda i metally, 2013, 512 p. [In Russ].
15. Pelevin A. E. Effects of magnetic flocculation on iron-bearing ore concentration. *Obogashchenie Rud.* 2021, no 4, pp. 15–20. [In Russ]. DOI: 0.17580/or.2021.04.03.
16. Erdenesul J., Morozov V. V. Optimizing copper-molybdenum ore milling coarseness using model-oriented criteria. *MIAB. Mining Inf. Anal. Bull.* 2018, no. 8, pp. 176–183. [In Russ]. DOI: 10.25018/0236-1493-2018-8-0-176-183.
17. Osipova N. V. Selecting parameters of feed control algorithm for wet autogenous mill for grinding iron ore. *MIAB. Mining Inf. Anal. Bull.* 2021, no. 10, pp. 146–156. [In Russ]. DOI: 10.25018/0236\_1493\_2021\_10\_0\_146.

18. Melekhina K. A., Ananyev P. P., Plotnikova A. V., Timofeev A. S., Shestak S. A. Modeling and optimization of complex ore pretreatment by disintegration in autogenous mills. *MIAB. Mining Inf. Anal. Bull.* 2020, no. 10, pp. 95–105. [In Russ]. DOI: 10.25018/0236–1493–2020–10–0–95–105.

19. Kuskov V. B., Lvov V. V., Yushina T. I. Increasing the recovery ratio of iron ores in the course of preparation and processing. *CIS Iron and Steel Review*, 2021, vol. 21, pp. 4–8. [In Russ]. DOI: 10.17580/cisr.2021.01.01.

20. Pelevin A. E. Production of hematite concentrate from hematite–magnetite ore. *MIAB. Mining Inf. Anal. Bull.* 2020. No. 3–1, pp. 422–430. [In Russ]. DOI: 10.25018/0236–1493–2020–31–0–422–430.

21. Tripathy S. K., Singh V, Murthy Y. R., Banerjee P. K., Suresh N. Influence of process parameters of dry high intensity magnetic separators on separation of hematite. *International Journal of Mineral Processing*. 2017, vol. 160, pp. 16–31. DOI:10.1016/j.minpro.2017.01.007.

22. Shrimali K., Atluri V., Wang Y., Bacchuwar S., Miller J. D. The nature of hematite depression with corn starch in the reverse flotation of iron ore. *Journal of Colloid and Interface Science*. 2018, vol. 524, pp. 337–349. DOI: 10.1016/j.jcis.2018.04.002.

23. Zhanglei Z., Zhen L., Wanzhong Y., Bin Y., Jinzhou Q., Ningning Z., Songjiang C., Yuexian Y., Jing C., Lijun L. Snap-in interactions between water droplets and hematite/quartz surfaces with various roughness after conditioning with soluble starch and DDA using a dynamic microbalance. *Minerals Engineering*. 2022, vol. 177, 107358. DOI: 10.1016/j.mineng.2021.107358.

24. Karmazin V. V., Karmazin V. I. *Magnitnye, elektricheskie i special'nye metody obogashcheniya poleznyh iskopaemyh. T. 1. Magnitnye i elektricheskie metody obogashcheniya poleznyh iskopaemyh* [Magnetic, electrical and special methods for mineral processing. Vol. 1. Magnetic and electrical methods for mineral processing]. Moscow, Gornaya Kniga, 2012, 672 p. [In Russ].

25. Doroshenko M. V., Bashlykova T. V. *Tekhnologicheskie svoystva mineralov: spravochnik dlya tekhnologov* [Technological properties of minerals: handbook for technologists]. Moscow, Teploenergetik, 2007, 296 p. [In Russ].

## ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ

*Пелевин Алексей Евгеньевич* — докт. техн. наук, доцент, профессор кафедры Обогащения полезных ископаемых Уральского государственного горного университета. ORCID iD <https://orcid.org/0000-0001-6063-3932>, ФГБОУ ВО «Уральский государственный горный университет» (Министерство науки и высшего образования РФ), г. Екатеринбург, 620144, ГСП, ул. Куйбышева, 30, e-mail: a-pelevin@yandex.ru.

## INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

*Pelevin A. E.*, Dr. Sci. (Eng.), Associate Professor, Professor of the Department of Mineral Processing at the Ural State Mining University, ORCID iD <https://orcid.org/0000-0001-6063-3932>, a-pelevin@yandex.ru, Ural State Mining University, 620144, 30, Kuibyshev st., Ekaterinburg, Russia.

Получена редакцией 12.11.2021; получена после рецензии 31.03.2022; принята к печати 10.04.2022.

Received by the editors 12.11.2021; received after the review 31.03.2022; accepted for printing 10.04.2022.

