

за счет сокращения транзитного стока путем расширения водозабора, то есть бурения дополнительных водозаборных скважин. Решаются и другие задачи. Например, расчет площади депрессионной воронки на Шилковском водозаборном участке величиной 15,2 км<sup>2</sup> по данным режимных наблюдений позволяет вычислить коэффициент водоотдачи равный

$$\frac{89 \cdot 86,4 \cdot 365}{1,04 \cdot 15,2 \cdot 10^6} = 0,18 \text{ долей единицы.}$$

Таким образом, изучение вопроса формирования ЭЗПВ в Уральской открытой гидрогеологической структуре не может быть полным без представления о строении и мощности коры выветривания, выполняющей решающую роль в регулировании питания подземных вод при их эксплуатации. На рассматриваемой территории сохранились два типа коры выветривания: линейный, имеющий в нижней части разреза каолиновый состав, и площадной преимущественно гидрослюдистого состава. Условная граница между ними проведена по изолинии мощностью 10 м, совпадающей с максимальной глубиной гидрослюдистого преобразования коры в дисперсной зоне.

Анализ многочисленных определений не выявил линейных меридиональных и широтных закономерностей минерального состава как мезозойской (каолинового состава), так и кайнозойской (гидрослюдистой) кор выветривания. Более того, в пределах одной климатической зоны размером 700–900 км на самых разнообразных по исходному составу горных породах развиваются одинаковые профили выветривания — «память» коры выветривания хранит в основном информацию об истории ее формирования [6]. Состав грунтов из различных геохимических зон коры оказывается одинаковым. Это обстоятельство обосновывает возможность широкого применения на Урале способа сокращения речного стока при оценке обеспеченности подсчитанных ЭЗПВ как в самостоятельном виде,

так и в сочетании с другими способами. Его эффективность возрастает с запада на восток и с севера на юг, то есть по мере активизации корообразования и ее сохранности по мере выполаживания рельефа.

Норма речного стока может быть оценена по литературным данным [9], уточненная на размер площади реки по критериям СП 33–101–2003 [8].

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Буданов, Н.Д. Гидрогеология Урала / Н.Д. Буданов. — М.: Наука, 1964. — 304 с.
2. Владимиров, Ю.И. Изменение стока малых рек при отборе подземных вод в горноскладчатой части Урала / Ю.И. Владимиров // Сб. работ по гидрологии. — № 18. — Л.: Гидрометеиздат, 1987. — С. 17–44.
3. Владимиров, Ю.И. Оценка и прогноз изменения речного стока под влиянием эксплуатации подземных вод в малых бассейнах горно-складчатой части Среднего Урала / Ю.И. Владимиров // Докл. секции русловых процессов и водного баланса Науч. Сов. по проблеме «Комплексное использование и охрана водных ресурсов» ГКНТ. — Вып. 2. Современное состояние малых рек СССР и пути их использования, сохранения и восстановления. — Л.: Гидрометеиздат, 1991. — С. 53–60.
4. Владимиров, Ю.И. К вопросу оценки эксплуатационных запасов подземных вод / Ю.И. Владимиров, С.Н. Елохина // Изв. УГГА. Серия. Геология и геофизика. — 2003. — Вып. 18. — С. 211–215.
5. Владимиров, Ю.И. Внутригодовое изменение стока малых речных бассейнов под влиянием отбора подземных вод в некарстующихся породах горноскладчатой части Среднего Урала / Ю.И. Владимиров // Проблемы загрязнения подземных вод и пути их решения. — Красноярск: СибНИИГиМ, 1981. — С. 73–83.
6. Костерова, Т.К. Инженерно-геологическое расчленение и оценка свойств элювиальных грунтов Южного и Среднего Урала: Автореф. дис. к.г.-м.н. / Т.К. Костерова. — М.: ПНИИС, 1986. — 18 с.
7. Новиков, В.П. Уточненная гидрогеологическая модель объектов Уральской складчатой области / В.П. Новиков, Д.В. Копылов // Разведка и охрана недр. — 2018. — № 3. — С. 36–41.
8. Определение основных расчетных гидрологических характеристик. СП 33–101–2003. — М.: Госстрой России, 2004.
9. Ресурсы поверхностных вод СССР. Т. 11. Средний Урал и Приуралье. — Л.: Гидрометеиздат, 1973. — 848 с.

© Коллектив авторов, 2019

Новиков Виталий Прокофьевич / zhukyelena@mail.ru  
Копылов Дмитрий Вадимович // ddddmiitry@yandex.ru  
Черепанова Елена Романовна // cherepanova@tfi-urfo.ru  
Жуковская Елена Петровна // zhukyelena@mail.ru

## ТЕХНИКА И ТЕХНОЛОГИЯ

УДК 549:622/533.31

Кыдзы М.В., Астахова Ю.М., Броницкая Е.С.,  
Ануфриева С.И., Гришаев Г.С. (ФГБУ «ВИМС»)

### ВЫБОР МЕТОДА КОМПЛЕКСНОЙ ПЕРЕРАБОТКИ ЖЕЛЕЗНЫХ РУД СЕРОВСКОГО МЕСТОРОЖДЕНИЯ

*Показано влияние минерального состава и текстурно-структурных особенностей железных руд Серовского месторождения на технологические свойства и поведение руды в операциях обогащения. Выявленная зависимость использована при разработке комплексной схемы переработки железной руды. При прямой металлургиче-*

*ской переработке исходной руды получены ликвидные товарные продукты. **Ключевые слова:** технологическая проба, железные руды, минералогия, обогащение, металлургия, чугуны, феррохром, сталь.*

Kydzhy M.V., Astahova Yu.M., Bronitskaya E.S., Anufrieva S.I.,  
Grishaev G.S. (VIMS)

### SELECTION OF THE METHOD OF COMPLEX PROCESSING OF THE IRON ORE OF SEROV DEPOSIT

*The influence of the mineral composition and textural-structural features of iron ores from the Serov deposit on the technological properties and behavior of the ore in the beneficiation operations is shown. The revealed dependence was put*

into the development of a complex scheme for the processing of iron ore. When direct metallurgical processing of the original ore obtained marketable products. **Keywords:** technological sample, iron ores, mineralogy, beneficiation, metallurgy, cast iron, ferrochrome, steel.

Серовское месторождение комплексных железных руд расположено в 15 км к северо-западу от г. Серов и может рассматриваться как крупнейшее на Северном и Среднем Урале. По разным оценкам в зависимости от бортового содержания руды авторские запасы достигают 1 007 357 тыс. т. Согласно работам предшественников, выделяются три типа железных руд, различных по минералогическим особенностям [7]:

1. Бобово-конгломератовые.
2. Первичные латеритно-охристые.
3. Переотложенные охристые.

Латеритные охристые руды, связанные с корой выветривания, имеют ограниченное распространение. Они сохранились на отдельных участках серпентинитов в восточной части депрессии.

Объектом исследований являлась технологическая проба бобово-конгломератовых руд (рис. 1), которые составляют основную массу руд месторождения и представляют практический интерес. По своим физическим свойствам и составу цемента руды делятся на 3 типа: бобово-конгломератовые плотные, бобово-конгломератовые с глинистым цементом и глинистые. Они имеют типичную текстуру, определившую их название, и ряд характерных структурных особенностей [1, 3].

По минеральному составу руда относится к гематит-гётитовому типу. Главными рудными минералами являются гётит, гидрогётит и гематит. Нерудные минералы представлены кварцем, серпентином, каолинитом, хлоритом, опалом.

Содержание в руде  $Fe_{\text{общ}}$  составляет 36,3 %,  $Cr_2O_3$ —2,66 %, Ni — 0,24 %, Co — 0,031 %. Железо присутствует в виде самостоятельных минеральных фаз — магнетита, гематита, гётита, гидрогётита и сидерита. Незначительное количество металла сосредоточено в хромшпинелиде, пирите, марказите, халькопирите, ильмените. Также железо входит в состав нерудных минералов — бертьерина, монтмориллонита, хлорита. Минеральной фазой хрома является хромшпинелид. Хром в качестве изоморфной примеси может присутствовать в слоистых алюмосиликатах. Электронной микроскопией обнаружен миллерит — минеральная фаза никеля. Самостоятельных фаз цветных металлов (кобальта, меди, цинка, свинца) не обнаружено [6].

Минеральный состав и текстурно-структурные особенности бобово-конгломератовой руды определяют необходимость использования различных методов и технологий обогащения. Технологические показатели при обогащении будут определяться вещественным составом руды, характером распределения ценных минералов и раскрываемостью их при измельчении, контрастностью технологических свойств и эффективностью применяемых разделительных процессов [5, 8].

**Детальное минералогическое и технологическое изучение при оценке обогатимости показало, что бобово-конгломератовая руда [2, 4–6]:**

1) имеет сложный, переменный гранулярный состав (крупные, средние, мелкие и тонкодисперсные рудные образования), характеризуется наличием сложных по составу бобов (содержат в себе один или несколько более мелких) (рис. 2), вторичных текстур и структур замещения (рудные минералы образуют сложные типы сростаний как друг с другом, так и с нерудными минералами, которые относятся к труднораскрываемым), а также тесными сростаниями рудных минералов на микро- и нано уровне (рис. 3). Это не позволяет



Рис. 1. Разновидности бобово-конгломератовой руды (А — более окисленная; Б — менее окисленная)

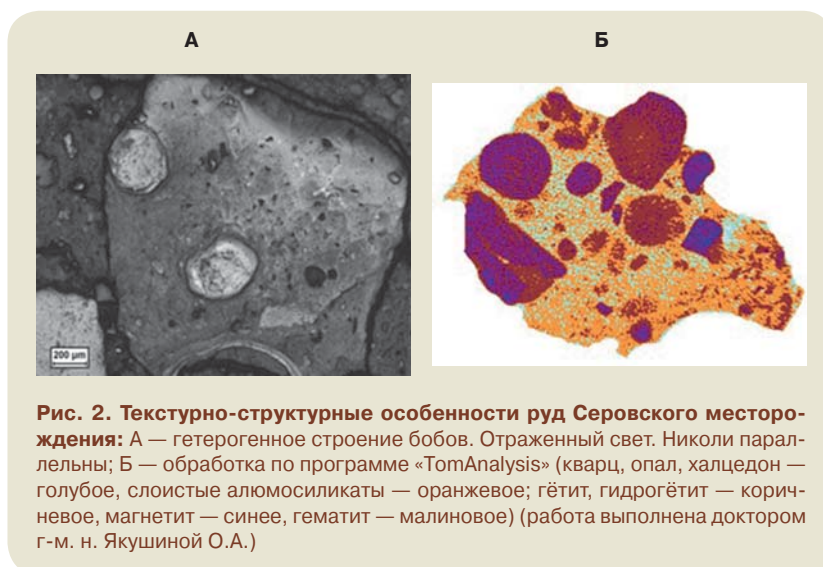
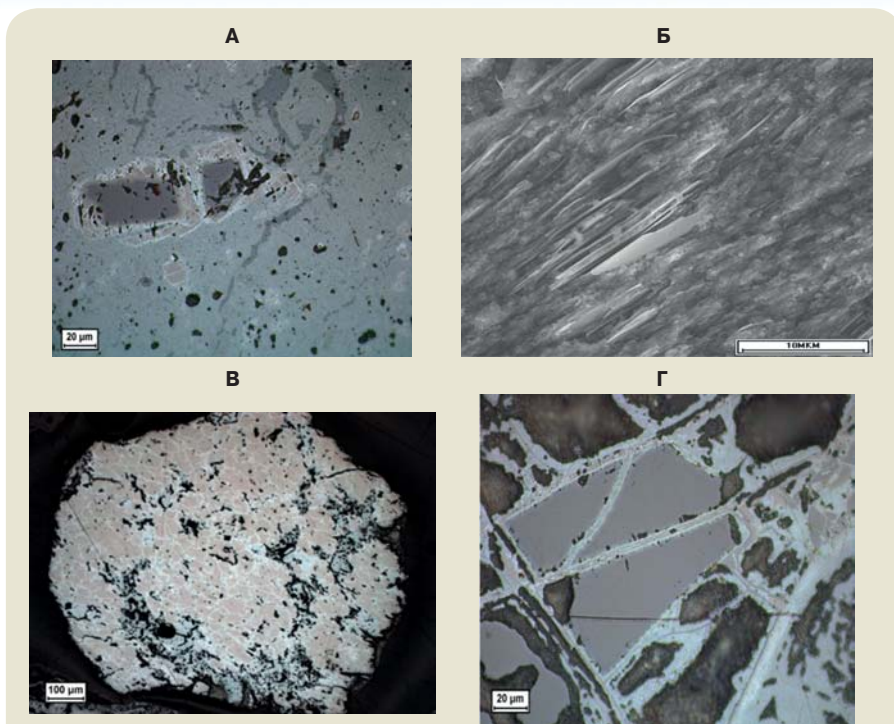


Рис. 2. Текстурно-структурные особенности руд Серовского месторождения: А — гетерогенное строение бобов. Отраженный свет. Никели параллельны; Б — обработка по программе «TomAnalysis» (кварц, опал, халцедон — голубое, слоистые алюмосиликаты — оранжевое; гётит, гидрогётит — коричневое, магнетит — синее, гематит — малиновое) (работа выполнена доктором г-м. н. Якушиной О.А.)



**Рис. 3. Особенности взаимоотношения рудных и нерудных минералов:** А — скрытокристаллический гётит-гидрогётит (серое) с включениями хромшпинелида (темно-серое), гематита (бело-серое) и магнетита (розовато-серое). Отраженный свет, николи параллельны; Б — пластинчатый гематит в тонкозернистом бертьерин-каолининовом цементе. РЭМ; В — маггемитизация (голубовато-серое) и мартитизация (бело-серое) магнетита (розовато-серый). Отраженный свет, николи параллельны; Г — увеличенный фрагмент зерна хромшпинелида, замещающегося по трещинкам магнетитом (розовато-серое), гематитом (бело-серое) и гидроксидами железа (серое). Отраженный свет, николи параллельны

достичь 100 % раскрытия рудных минералов даже в тонких классах крупности и приводит к образованию сростков с неустойчивыми гравитационно-магнитными свойствами, о чем свидетельствует оценка раскрытия железосодержащих минералов в классах ситового анализа руды (табл. 1).

Минералогическое изучение характера раскрытия рудных и нерудных минералов в материале различной крупности показало, что четко прослеживается увеличение количества «свободных» зерен рудных минералов от крупных классов к тонким:

— «свободные» и богатые зерна в крупных классах (–25+10 мм) руды представлены преимущественно рудными агрегатами, сформированными минералами железа (магнетит-гематит, гётит-гидрогётит), а также

слоистыми алюмосиликатами, присутствующими в весьма незначительном количестве;

— в классе крупности –10+5 мм богатые сростки представлены обломками конгломератов, состоящие из бобов, рудных галек переменного состава (магнетит, гематит, хромшпинелид). Цемент, скрепляющий бобы и рудные гальки, представлен скрытокристаллической массой гётит-гидрогётит глинистого состава. Рядовые сростки в данных классах крупности представлены рудными агрегатами глинистого-гётитового состава с редкими включениями в них в виде вкрапленности и примазок (магнетит, хромшпинелид). Бедные сростки и нерудные минералы — обломки серпентина с включениями глинистых минералов и примазок гидрогётит-гётитового состава;

— в классе крупности –5+3 мм раскрываются наиболее крупные бобы и обломки рудных минералов. Количество богатых сростков, представленных конгломератами, уменьшается. Отмечаются агрегаты преимущественно магнетит-гётитового состава в виде обломков кавернозного строения и «бобов».

Бедные сростки и нерудные минералы представлены обломками серпентина, глинистыми минералами и обломками кварца неправильной формы со сглаженными очертаниями;

— в классе крупности –3+1 мм количество свободных зерен увеличивается до 36 % за счет раскрытия практически всех бобов, за исключением самых мелких (менее 1 мм);

— начиная с класса крупности –1+0,5 мм начинают освобождаться более мелкие обломки рудных агрегатов, а также оставшиеся мелкие бобы. В материале крупностью менее 1 мм происходит разрушение и перераспределение агрегатов. В первую очередь образуются хрупкие окатанной формы агрегаты, сформированные в основном гётитом и глинистыми

**Таблица 1**  
Распределение типов сростков по классам крупности в исходной руде

Типы сростков	Класс крупности, мм							
	–25+10	–10+5	–5+3	–3+1	–1+0,5	–0,5+0,25	–0,25+0,074	–0,074+0,044
Количество сростков в %, отн.								
Свободные зерна	—	—	—	—	—	17	20	24
Богатые	56	54	46	49	58	27	21	11
Рядовые	11	12	11	12	6	16	9	10
Бедные	5	6	35	10	4	—	—	—
Нерудные минералы	20	26	26	29	32	40	50	55

**Таблица 2**  
**Минералогические факторы, влияющие на обогатимость**

№ п/п	Особенность строения	Влияние на технологические свойства	Влияние на процессы глубокого обогащения		
			рудоподготовительные операции	гравитационное обогащение	магнитное обогащение
1	<b>Переменный гранулярный состав</b>	Присутствие как крупных (бобы, гальки), средних (обломки агрегатов рудных минералов), мелких (обломки зерен), так и тонкодисперсных рудных образований, имеющих варьирующие значения твердости и плотности	Не позволит достичь полного раскрытия рудных минералов даже в материале мелких классов крупности; тесные срастания рудных минералов на микро и нано уровне друг с другом, не позволит провести их селективное выделение	Удастся извлечь только часть рудных минералов, присутствующих в гальках, бобах и индивидуализированных зернах; потери железа в хвостах гравитации будут связаны с железосодержащими породообразующими минералами (хлорит, серпентин, шамозит), образующимися при разрушении глинисто-железистых и железо-глинистых агрегатов	Сростки сидерита с кварцем, каолинита с гидроксидами железа, хромшпинелида с гематитом имеют варьирующее значение магнитных свойств, что не позволит сконцентрировать железо в конкретной магнитной фракции
2	<b>Высокая дисперсность</b>	Наблюдается слабая контрастность по плотности, обусловленная варьирующими значениями плотности тонкодисперсных агрегатов переменного состава (каолинит, гётит, гидрогётит)	Природная крупность гётита менее 0,01 мм, при операции промывки способствует накоплению минерала в шламах, увеличивая в них потери железа	Потеря железа со шламами	Накопление гётита в немагнитной фракции обуславливает потери железа; флокуляция магнетита и гематита тонкими частицами гётита
3	<b>Наличие вторичных текстур (корковые, пленочные, каемчатые) и структур замещения</b>	Повышение хрупкости, снижение плотности, наличие тонкой пленки гидроксида железа на нерудных гальках приводит к нестабильности гравитационно-магнитных свойств	Неравномерное распределение бобов, галек и обломков в руде, приведет к невозможности селективного измельчения и выделения рудной составляющей; увеличение выхода тонкого класса; труднораскрываемые сростки сидерит-кварцевого состава	Нестабильные гравитационные свойства, засорение концентрата породообразующими минералами	Нестабильные магнитные свойства минералов, снижение содержания железа в магнитных фракциях
4	<b>Полиминеральный состав</b>	Повышение микротвердости, снижение удельной магнитной восприимчивости, варьирующее значение плотности	Труднораскрываемые сростки сидерит-кварцевого состава; весьма тесная ассоциация каолинита с гидроксидами железа определяет невозможность их селективного разделения; присутствие в серпентинитах хромшпинелида и гематита, реже магнетита в виде вкрапленников	Повышение содержания минералов железа в хвостах гравитации; не представляется возможности выделения хрома гравитационными методами из-за варьирующих показателей плотности	Засорение магнитной фракции нерудными минералами; часть рудных минералов уйдет в немагнитную фракцию; не представляется возможности выделения хрома магнитными методами из-за неустойчивых магнитных свойств

минералами с примазками и вкрапленниками магнетита, гематита, хромшпинелида, богатые плотные агрегаты округлой формы (бобы) и обломки рудных агрегатов переменного состава (гематит-магнетита) с примазками гидроксидов железа на поверхности. Рядовые сростки в данном материале представляют собой агрегаты переменного глинисто-гётитового состава. Отмечаются увеличения содержания кварца и глинистых минералов (каолинит, хлорит) в виде отдельных зерен и агрегатов;

— с уменьшением класса крупности раскрываются все более тонкие зерна и агрегаты, и в классе  $-0,0074+0,044$  мм раскрытие достигает 46 %. В тонких классах гематит находится в срастаниях с магнетитом и в виде свободных зерен. Доля нерудных минералов увеличивается, они представлены зернами серпентина, глинистых минералов (каолинит, шамозит) как в сростках между собой, так и в виде свободных зерен — сидерита. Глинистые минералы представлены хрупкими, «вязкими», землистыми агрегатами, сформиро-

ванными индивидами пластинчатой и листоватой формы, часто с пленками гидроксидов железа (Е.М. Со- рокин, М.В. Иванова и др., 2014; М.В. Иванова, 2016; Б.И. Пирогов, 2017) [4].

Ценные компоненты в тонких классах практически равномерно распределены по классам крупности, что указывает на низкую степень их раскрытия.

В целом для продуктов гранулометрического анализа отмечена тенденция накопления в крупных классах свободных и богатых зерен агрегатного строения, по существу являющихся рудными агрегатами, которые с уменьшением крупности материала «раскрываются», при этом высвобождаются индивидуализированные зерна рудных (магнетита, хромита, гематита, гётита) и нерудных минералов.

Отмечается высокое содержание «бедных» сростков во всех классах крупности, количество которых незначительно уменьшается с уменьшением классов крупности с 72 % ( $-5+3$  мм) до 53 % ( $-0,1+0,074$  мм). Они представляют собой обломки глинистого цемента, пропитанного тонкодисперсными оксидами и гидроксидами железа, и обломки бертьерин-каолинитового цемента с незначительным количеством рудных минералов.

**Свободные зерна** представлены рудными минералами — магнетитом и гематитом. Содержание в свободных зернах гематита и гётита в виде включений не превышает 4 %. В более тонких классах происходит наибольшее раскрытие рудных сростков магнетита.

**Богатые сростки** представлены двумя главными рудными минералами — магнетитом и гётитом. Визуально однородные зерна гётита могут быть условно отнесены к богатым сросткам, так как особенности микростроения агрегатов не позволяют с точностью определить присутствие и содержание в них тонких включений нерудных минералов. При исследовании богатых сростков гётита выявлена магнетитовая вкрапленность и тонкие прожилки в зернах гётита. Богатые сростки магнетита сформированы магнетитом и гематитом.

**Рядовые и бедные сростки** представлены гётитом в сростании с магнетитом, образующие в основном включения с глинистыми минералами. В последних гётит присутствует на поверхности минералов в виде включений и пленочных выделений.

**Нерудные минералы** представлены главным образом глинистыми минералами — серпентином, кварцем, сидеритом. При этом за исключением материала крупности  $-0,074$  мм глинистые минералы присутствуют в виде агрегатов мономинерального и полиминерального составов [2, 4, 5, 8];

2) кроме этого, бобово-конгломератовая руда обладает слабоконтрастными свойствами как по плотности, так и по удельной магнитной восприимчивости;

3) характеризуется значительным количеством силикатов железа (бертьерин, шамозит), что будет способствовать накоплению железа в хвостах и шламах.

Перечисленные факторы будут негативно влиять на эффективность процессов глубокого обогащения (табл. 2).

Принципы формирования технологической схемы глубокого обогащения основывались на результатах, полученных при изучении вещественного состава и технологических свойств бобово-конгломератовой руды. Экспериментально отработаны различные варианты комбинации гравитационных и магнитных методов [5, 8]. Наличие в руде высокой дисперсности (руда представлена более чем на 50 % классом крупности  $-0,044$  мм, при этом почти половина материала (41,5 %) представлена классом крупности  $-0,010$  мм), а также цементирующей массы различного минерального состава (гётит-гидрогётит-каолинитового и бертьерин-каолинитового) определяет необходимость применения операции промывки с целью избежания залипания рабочего пространства дробилок, рабочей поверхности грохотов, забивки бункеров и снижения крупности дробленого продукта.

Так как руда тонкодисперсная, необходимо отметить, что такой тонкий материал не может эффективно обогащаться в магнитных сепараторах обычного типа. Для эффективного разделения тонких зерен слабомангнитных руд применяется сепаратор с увеличенной поверхностью зоны магнитного разделения, повышенной напряженностью и высоким градиентом магнитного поля — полиградиентный сепаратор.

Разработка схемы осуществлялась при использовании современного оборудования: промывочной установки ПОУ-4М, диафрагмовой отсадочной машины ALLJIG-S-400 с боковой пульсацией, высокоградиентного магнитного сепаратора ЭКЛ-2, концентратора «Wilfley», винтового сепаратора МГ6.3.

Разработанная гравитационно-магнитная схема включает следующие операции:

- промывку и классификацию руды по классам крупности;
- отсадку зернистых классов крупностью  $-25+6$ ;  $-6+3$  и  $-3+1$  мм;
- доизмельчение промпродуктов отсадки до крупности  $-0,5$  мм;
- гравитационно-магнитное обогащение доизмельченных продуктов отсадки и шламов промывки крупностью  $-0,5+0$  мм;
- обесшламливание в гидроциклоне шламов промывки;
- полиградиентную сепарацию слива гидроциклона;
- гравитационное обогащение песков гидроциклона.

По данной схеме получен концентрат, содержащий 50,50 %  $Fe_{общ}$ , 2,35 % Cr, 0,21 % Ni и 0,035 % Co; извлечение составило соответственно 56,31 %, 55,69 %, 35,19 % и 44,68 % при выходе 40,95 % (табл. 3). Невысокие показатели обогащения (табл. 3) обусловлены слабыми контрастными свойствами минералов как по плотности, так и по удельной магнитной восприимчивости.

Несмотря на проведенную классификацию и обесшламливание материала, в процессе отсадки и концентрации на столе происходит частичное разру-

Таблица 3

Сводные показатели глубокого обогащения бобово-конгломератовой руды Серовского месторождения по гравитационно-магнитной схеме

Наименование фракции	Выход, %	Содержание, %				Извлечение, %			
		Fe <sub>общ</sub>	Cr	Ni	Co	Fe <sub>общ</sub>	Cr	Ni	Co
Σ Концентрат	40,95	50,50	2,35	0,21	0,035	56,31	55,69	35,19	44,68
Σ Промпродукт	9,79	33,11	1,64	0,25	0,036	8,83	9,29	10,02	10,99
Σ Хвосты	10,69	21,74	1,15	0,17	0,032	6,33	7,11	7,44	10,66
Σ Шламы	38,57	27,17	1,25	0,30	0,028	28,54	27,90	47,35	33,67
Исходная руда	100,0	36,30	1,82	0,24	0,031	100,0	100,0	100,0	100,0

шение различных рудных агрегатов, что приводит к разубоживанию конечных продуктов. В концентрат, в котором содержание Fe<sub>общ</sub> не превышает 50 %, извлекаются крупные свободные зерна магнетита, гематита, а также рудные агрегаты существенно гётитового состава, что определяет его частичное разубоживание.

Содержание Fe<sub>общ</sub> в промпродукте находится практически на уровне исходной руды — 33,11 %, что происходит за счет концентрации в нем агрегатов каолинит-гётитового состава, также магнетита и гематита, в которых наблюдается неравномерная вкрапленность хромшпинелида и серпентинита, что приводит к варьирующим значениям плотности.

Хвосты при выходе 10,69 % содержат 21,74 % Fe<sub>общ</sub> за счет наличия железосодержащих породообразующих минералов — хлорита, серпентина, шамозита. Основные потери железа (28,54 %) связаны со шламами, выход которых составляет 38,57 % при содержании Fe<sub>общ</sub> 27,17 %. В них концентрируется значительное количество тонких частиц гётит-гидрогётитового состава (размер которых менее 0,003 мм), образующихся при разрушении различных разновидностей рудных агрегатов.

Основные потери железа при проведении магнитной сепарации связаны с немагнитной фракцией, что обусловлено максимальным накапливанием в этой фракции тонкодисперсного гётита, обладающего низкой удельной магнитной восприимчивостью, а также его способностью флокулировать (налипать) другие минералы, такие как магнетит и гематит.

Таким образом, проведенные испытания с использованием методов глубокого обогащения привели к получению невысоких технологических показателей — содержание железа в концентрате не превышает 55 % Fe<sub>общ</sub> при извлечении ~50–60 %, при этом хром и никель при механическом обогащении практически до половины теряются с хвостами.

На практике основным сырьем для получения губчатого железа является магнетитовый концентрат, к которому предъявляются следующие требования [5]:

- общее содержание железа — максимальное, но не ниже 67 %;
- содержание кислотных оксидов (SiO<sub>2</sub> + Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> + TiO<sub>2</sub>) предпочтительно < 2 %, допускается < 4 %;
- содержание основных оксидов допускается < 3 % (поскольку они заменяют флюс в сталеплавильном производстве);

- содержание фосфора — < 0,030 %;
- содержание серы — < 0,008 %;
- содержание марганца — минимально возможное для уменьшения шлакообразования в электропечи;
- содержание щелочей (Na и K) — минимально возможное, так как они способствуют разрушению шихтовых материалов во время восстановления;
- содержание Cr, Pb, Cu, Sn, Ni, Mo, As, Sb, V, Li и других примесей цветных металлов должно быть максимально ограничено, а содержание Cu + Ni + Cr + Mo + Sn должно быть < 0,16 %. Таким пределом ограничено содержание этих элементов в оборотном металлургическом ломе.

Полученный концентрат характеризуется повышенными содержаниями хрома (2,5 %) и никеля (0,21 %) и не отвечает ни по одному из требований к качеству железорудного материала для получения губчатого железа, а также для доменного производства чугуна в связи с тем, что образуются карбиды и карбонитриды, присутствие которых в горне печи снижает фильтруемость коксового слоя в горне и ухудшает ход доменной печи [5]. Наличие хрома в концентрате связано с тем, что в серпентинитах присутствуют хромшпинелид и гематит, реже магнетит в виде вкрапленников. Серпентинит в свою очередь подвержен вторичным изменениям, в результате чего образуются гидроксиды железа и опал, предопределяющие невозможность выделения механическими методами хрома из концентрата.

С целью снижения содержания хрома в концентрате, а также повышения технологических показателей переработки исходной бобово-конгломератовой руды были изучены три способа их подготовки к металлургическому переделу, проведенные в ГНЦ РФ ФГУП «ЦНИИчермет им. И.П. Бардина»: плавка напрямую; плавка предварительно металлизированного продукта; плавка сырья, прошедшего магнетизирующий обжиг. Сравнительный экономический анализ испытаний показал, что плавка руды напрямую наиболее предпочтительна, т.к. сквозное извлечение из руды выше, чем из концентрата: на 38,5 % для Fe; на 30,5 % для Cr и на 58,5 % для Ni, а также ввиду отсутствия в технологической схеме энергоемких агрегатов (шахтная печь с низкой производительностью, необходимость подготовки восстановительных газов и др.) (рис. 4).

В результате проведенных экспериментальных плавков напрямую из исходной руды получена следующая товарная продукция:

- чугун легированный ГОСТ 7769–82;
- феррохром (FeCr) ГОСТ 4757–91;
- стальная заготовка ГОСТ 26054–81;
- шлаки от выплавки чугуна и феррохрома.

*Сквозное извлечение железа и никеля в стальную заготовку составило соответственно 96,0 % и 94,0 %, а хрома в феррохром — 81,0 % [5].*

Минералого-технологическое изучение комплексной бобово-конгломератовой железной руды при оценке ее обогатимости показало, что:

- руда обладает сложным гранулярным составом, обусловленным присутствием как крупных (бобы, гальки) и средних (обломки агрегатов рудных минералов), так и мелких (обломки зерен) и тонкодисперсных рудных образований. Рудные агрегаты имеют варьирующие значения твердости и плотности, что способствует накоплению слагающих их минералов во всех классах крупности и не позволяет достичь полного раскрытия рудных минералов даже в материале тонких классов крупности;

- руда отличается высокой степенью гетерогенности, обусловленной многостадийным преобразованием

ем в зоне окисления, что выражается в присутствии нескольких разновидностей железных минералов, отличающихся морфологией выделений и особенностями конституции (изменение состава, характера степени упорядоченности, дефектности, мозаичности);

- рудные минералы образуют сложные типы сростаний как друг с другом (вплоть до полных псевдоморфоз), так и с нерудными минералами (пойкилитовые, коррозионные). Такие сростания относятся к весьма труднораскрываемым. При измельчении образуется большое количество сростков с неустойчивыми гравитационно-магнитными свойствами, что в результате приводит к получению некондиционного концентрата глубокого обогащения (содержание железа менее 60 %);

- процесс неравномерной мартитизации, а также неоднородность гематита негативно влияют на магнитные свойства рудных агрегатов, а образование кайм магнетита вокруг зерен хромпикотита приводит к увеличению удельной магнитной восприимчивости последнего и способствует накоплению минерала в магнитных фракциях, тем самым увеличивая содержание хрома в концентрате;

- тесное сростание каолинита с гидроксидами железа, а также присутствие шамозита, бертьерина и монтмориллонита негативно влияют на технологические свойства и приводит к потерям железа (28,54 %) в тонких (шламовых) классах крупности;

- морфологические особенности кристаллически-зернистого сидерита в целом благоприятно влияют на его раскрытие. Однако наличие коррозионных структур обуславливает тесные сростания сидерита и кварца, образуя трудно-раскрываемые сростки.

В ходе экспериментальных исследований методами глубокого обогащения удалось извлечь только часть рудных минералов, присутствующих в гальках, бобах и индивидуализированных зернах. При этом следует обратить внимание, что если рудные гальки в основном мономинеральные, то бобы отличаются различной степенью гетерогенности. Значительное количество рудных минералов концентрируется в хвостах обогащения. Учитывая высокую дисперсность цементирующей массы с уменьшением класса крупности прослеживается тенденция увеличения количества гётита-гидрогётита, который совместно с каолинитом накапливается в наиболее тонком классе крупности

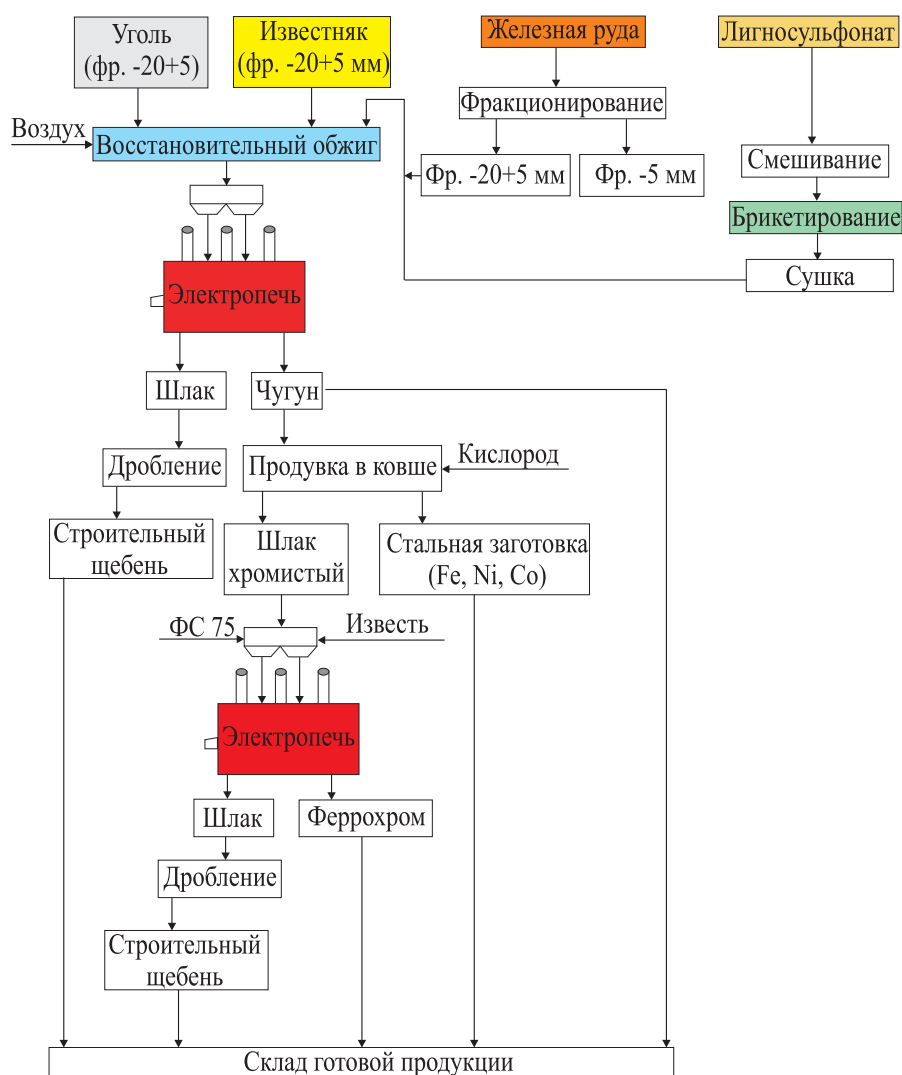


Рис. 4. Блок-схема металлургического передела руды Серовского месторождения

-0,010+0 мм, т.е. практически не обогащаемом материале.

В целом минералогические особенности бобово-конгломератовых руд являются неблагоприятными для методов глубокого обогащения, однако текстурно-структурные особенности руды (высокая дисперсность подавляющей части руды, неоднородность, сложные взаимоотношения минералов, обусловленные развитием вторичных текстур и структур, наличие трещин усыхания и пр.) свидетельствуют о возможности прямой металлургической переработки.

Полученные данные были использованы при составлении технологической части ТЭО временных кондиций и отчета с подсчетом запасов железных руд Серовского месторождения, прошедшие защиту в ГКЗ в 2016 г.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Аликберов, В.М. Об инвестиционной привлекательности железорудных месторождений нераспределенного фонда недр / В.М. Аликберов, Е.С. Броницкая, Б.И. Пирогов, Л.П. Тигунов, Е.В. Зублюк // Разведка и охрана недр. — 2013. — № 2 — С. 57–61.
2. Астахова, Ю.М. Минералогические особенности слоистых силикатов железных руд Серовского месторождения, влияющие на их обогатимость / Ю.М. Астахова, Е.М. Сорокин, Е.Г. Ожогина, Ю.Н. Шувалова // Сб. трудов «Прогрессивные методы обогащения и комплексной переработки природного и техногенного минерального сырья» (Плаксинские чтения — 2014). — 2014 — С. 84–85.
3. Вторушин, А.В. Вещественный состав и происхождение хромистых железных руд Серовского района / А.В. Вторушин, Н.А. Егорова // Тр. Свердловского горного ин-та. — 1961. — Вып. 38. — С. 67–93.

4. Иванова, М.В. Особенности раскрытия минералов железа в рудах Серовского месторождения / М.В. Иванова, Ю.М. Астахова, Е.М. Сорокин, Е.С. Броницкая, Е.Г. Ожогина // Разведка и охрана недр. — 2015. — № 3. — С. 37–41.

5. Иванова, М.В. Минералогические факторы, влияющие на выбор оптимальных методов переработки комплексных железных руд Серовского месторождения / М.В. Иванова, Ю.М. Астахова, Е.С. Броницкая, С.И. Ануфриева, В.М. Ермолов // Сб. мат. IV-ой конференции «Перспективы развития металлургии и машиностроения с использованием завершенных фундаментальных исследований и НИОКР: ФЕРРОСПЛАВЫ» «НИОКР-2018». Екатеринбург, 2018. — С. 161–164.

6. Иванова, М.В. Технологические решения при разработке схем обогащения железных руд на основе минералогических данных / М.В. Иванова // Сб. статей по материалам докладов X Российского семинара по технологической металлургии. — Петрозаводск: Карельский научный центр РАН, 2016. — С. 76–81.

7. Кононова, Л.И. Геологический отчет с подсчетом запасов по Серовскому месторождению бобово-конгломератовых и охристых железных руд по состоянию разведанности на 1 июня 1960 г. / Л.И. Кононова, А.А. Шестакова, Б.М. Суздаев — Уралгеолфонд, пос. Рудничный, 1960. — 201 с.

8. Сорокин, Е.М. Минералого-технологические особенности железных руд Серовского месторождения / Е.М. Сорокин, Ю.М. Астахова, И.Г. Быстров., М.В. Иванова, Е.Г. Ожогина, В.В. Ружицкий, О.А. Якушина // Вестник ИГ Коми НЦ УрО РАН, Петрозаводск, 2015. — № 1(241) — С. 18–23.

© Коллектив авторов, 2019

Кыдзы Маргарита Валерьевна // margo\_898989@mail.ru  
Астахова Юлия Михайловна // astachova\_j@mail.ru  
Броницкая Елена Сергеевна // vims@df.ru  
Ануфриева Светлана Ивановна // anufrieva.05@mail.ru  
Гришаев Георгий Сергеевич // zhoric89@mail.ru

## УПРАВЛЕНИЕ И ЭКОНОМИКА

УДК 552.332:622.1; 571.56:338.984

Слепцов А.П.<sup>1</sup>, Толстов А.В.<sup>2</sup>, Томашев А.В.<sup>3</sup>,  
Самсонов Н.Ю.<sup>2</sup>, Баранов Л.Н.<sup>4</sup> (1 — АО «Якутск-  
геология», 2 — НИГП АК «АЛРОСА» (ПАО), 3 — ФГБУ  
«ВИМС», 4 — ИГМ СО РАН)

### НОВОЕ В МЕТОДИКЕ ПОДСЧЕТА ЗАПАСОВ МНОГО- КОМПОНЕНТНЫХ РУД (НА ПРИМЕРЕ ТОМТОРСКО- ГО РУДНОГО ПОЛЯ)

Представлен новый подход к подсчету запасов комплексных редкоземельных руд Северного и Южного участков Томторского рудного поля, выполненный по результатам оценочных работ, проведенных ГУГПП РС(Я) «Якутскгеология» в 2015–2016 гг. Разработаны новые научно-методические компоненты для подсчета запасов редкоземельных руд участков Северный и Южный по четырем вариантам бортового содержания с учетом перевода полезных компонентов в условный ниобий ( $Nb_2O_{3\text{усл}}$ ) при регулировании различных геолого-промышленных параметров исходной руды. Получены результаты повариантного подсчета запасов редкоземельных руд Северного и Южного участков Томторского рудного поля. Выполнены соответствующие технико-

экономические расчеты для ТЭО временных разведочных кондиций. **Ключевые слова:** запасы, редкоземельные металлы, Томторское рудное поле, технико-экономическое обоснование.

Sleptsov A.P.<sup>1</sup>, Tolstov A.V.<sup>2</sup>, Tomashev A.V.<sup>3</sup>, Samsonov N.Yu.<sup>2</sup>,  
Baranov L.N.<sup>4</sup> (1 — Yakutskgeology, 2 — Research and Exploration  
Enterprise — ALROSA, 3 — VIMS, 4 — IGM SB RAS)

### NEW APPROACHES IN THE METHOD OF COUNTING MULTI-COMPONENT ORE RESERVES (ON THE EXAMPLE OF THE TOMTOR ORE FIELD)

A new approach to calculating the reserves of complex rare-earth ores of the Northern and Southern sections of the Tomtor ore field, carried out according to the results of the assessment work carried out by the Yakutskgeology in 2015–2016, is presented. New scientific and methodological components have been developed for estimating reserves of rare-earth ores in the North and South sections of four on-board content based on the conversion of useful components into conditional niobium ( $Nb_2O_3$ ) while regulating various geological and industrial parameters of the original ore. The results of an optional calculation of the reserves of rare-earth ores in the Northern and Southern sections of the Tomtor ore field are obtained. The corresponding technical and economic calcula-