



УДК 669.053.2

DOI 10.17073/0368-0797-2023-4-479-484



Оригинальная статья

Original article

## СЕЛЕКТИВНОЕ ТВЕРДОФАЗНОЕ ВОССТАНОВЛЕНИЕ ЖЕЛЕЗА В ФОСФОРИСТЫХ ООЛИТОВЫХ РУДАХ

Б. Сулеймен<sup>✉</sup>, С. П. Салихов, Ф. Ш. Шарипов, В. Е. Рошин

Южно-Уральский государственный университет (Россия, 454080, Челябинск, пр. Ленина, 76)

[✉ bakysuleimen@mail.ru](mailto:bakysuleimen@mail.ru)

**Аннотация.** Представлены результаты экспериментальных исследований по селективному твердофазному восстановлению железа и фосфора в оолитовых рудах Лисаковского и Аятского месторождений. С использованием рентгенофазового анализа определен фазовый состав исходных руд и образцов после восстановительного обжига. В рудах обоих месторождений обнаруживаются гетит, магнетит и кварц. Фосфор в руде Аятского месторождения находится в виде фосфата алюминия и гидрофосфата железа, а в образцах Лисаковской руды – в составе гидрофосфата кальция. Эксперименты по восстановительному обжигу проводились в печи сопротивления при температуре 1000 °С и времени выдержки 5 ч. После обжига в атмосфере СО в образцах появляется  $\alpha$ -железо, в то время как фосфор остается в составе фосфатов железа, кальция и алюминия. После обжига в смеси с графитом фосфор восстанавливается твердым углеродом из фосфатов железа и кальция и переходит в металл, однако остается в составе фосфата алюминия. Исследования с использованием микрорентгеноспектрального анализа показывают, что содержание фосфора в металлической фазе после восстановления твердым углеродом составляет 2,0 – 3,5 % (ат.). При восстановлении в атмосфере СО фосфора в металлической фазе практически не обнаруживается. При этом количество остаточного железа в оксидной фазе после восстановления угарным газом значительно превышает количество железа после восстановления в смеси с углеродом. Результаты экспериментов подтверждают возможность селективного восстановления железа оксидом углерода СО без восстановления фосфора.

**Ключевые слова:** оолитовая железная руда, восстановительный обжиг, оксид углерода СО, селективное восстановление, металлизация, металлическое железо, фосфор

**Для цитирования:** Сулеймен Б., Салихов С.П., Шарипов Ф.Ш., Рошин В.Е. Селективное твердофазное восстановление железа в фосфористых оолитовых рудах. *Известия вузов. Черная металлургия.* 2023;66(4):479–484. <https://doi.org/10.17073/0368-0797-2023-4-479-484>

## SELECTIVE SOLID-PHASE REDUCTION OF IRON IN PHOSPHOROUS OOLITE ORES

B. Suleimen<sup>✉</sup>, S. P. Salikhov, F. Sh. Sharipov, V. E. Roshchin

South Ural State University (76 Lenina Ave., Chelyabinsk 454080, Russian Federation)

[✉ bakysuleimen@mail.ru](mailto:bakysuleimen@mail.ru)

**Abstract.** Selective solid-phase reduction of iron and phosphorus in oolite ores of the Lisakovsky and Ayat deposits was experimentally studied. Using X-ray phase analysis, the phase composition of the initial ores and samples after reduction roasting was determined. Goethite, magnetite and quartz were found in the ores of both deposits. Phosphorus in the ore of the Ayat deposit is in the form of aluminum phosphate and iron hydrophosphate, and in the samples of the Lisakovsky ore – as a component of calcium hydrophosphate. Experiments on reduction roasting were carried out in a resistance furnace at 1000 °C with holding time of 5 h. After roasting in CO atmosphere,  $\alpha$ -Fe appears in the samples, while phosphorus remains as a component of iron, calcium and aluminum phosphates. After roasting in a mixture with graphite, phosphorus is reduced by solid carbon from iron and calcium phosphates and passes into metal, but remains as a component of aluminum phosphate. Studies using microx-ray diffraction analysis show that phosphorus content in the metal phase after reduction with solid carbon is 2.0 – 3.5 at. %. When CO is reduced in the atmosphere, phosphorus in the metallic phase is practically not detected. At the same time, the amount of residual iron in the oxide phase after carbon monoxide reduction significantly exceeds the amount of iron after reduction in a mixture with carbon. The experimental results confirm the possibility of selective reduction of iron by carbon oxide CO without phosphorus reduction.

**Keywords:** oolitic iron ore, reduction roasting, carbon monoxide, selective reduction, metallization, metallic iron, phosphorus

**For citation:** Suleimen B., Salikhov S.P., Sharipov F.Sh., Roshchin V.E. Selective solid-phase reduction of iron in phosphorous oolite ores. *Izvestiya. Ferrous Metallurgy*. 2023;66(4):479–484. <https://doi.org/10.17073/0368-0797-2023-4-479-484>

## ВВЕДЕНИЕ

В связи с ростом производства черных металлов и применением руд с низким содержанием железа комплексное использование минерального сырья в черной металлургии становится все более актуальным [1–3]. В последние годы пристальное внимание уделяется вопросам извлечения [4–6] и переработки [7] железа из оолитовых железных руд с повышенным содержанием фосфора, а также вопросам обогащения [8] и дефосфорации [9] этих руд. Огромные запасы оолитовых руд имеются в странах Азии [10; 11], Африки [12; 13], Европы и Северной Америки [13–15]. К этому же типу относятся и руды Аятского и Лисаковского месторождений. Руды этих двух крупных месторождений Казахстана имеют близкое содержание железа, но отличаются содержаниями фосфора, ванадия и алюминия.

Рыхлая часть аятских руд состоит из обломков оолитов, микрозерен кварца и глинозема, а кусковая часть – из связанных глинисто-цементной массой оолитов [16]. Среднее содержание железа по месторождению составляет 37,1%. Руды содержат 16,4%  $\text{SiO}_2$ , 6%  $\text{Al}_2\text{O}_3$  и 0,37% P. Лисаковские руды представляют собой рыхлую смесь оолитов бурого железняка и зерен кварцевого песка с содержанием железа от 30 до 40% и повышенным (до 0,8%) содержанием фосфора [17]. Обогащение таких руд требует использования сложных и затратных схем, при этом фосфор не удаляется, что влияет на технологию металлургического передела. В доменной печи, где происходят обжиг (в шахте) и плавление

(в горне) в восстановительной атмосфере, фосфор полностью восстанавливается и переходит в металл. Удаление фосфора из чугуна в ковшах или сталеплавильных агрегатах приводит к дополнительным затратам на материалы, энергию и потерю времени. Таким образом, дефосфорация до или в процессе производства чугуна является важным этапом при использовании высокофосфористых оолитовых руд.

В работах [18–20] была изучена возможность селективного твердофазного восстановления железа в рудах Аятского месторождения. Согласно результатам этих исследований, селективное восстановление железа может быть достигнуто при восстановлении оксидом углерода при температуре 1000 °С.

Цель настоящей работы заключается в сравнительном исследовании процесса твердофазного селективного восстановления железа без восстановления фосфора в оолитовых рудах Аятского и Лисаковского месторождений.

## МЕТОДИКА ЭКСПЕРИМЕНТА

В качестве объектов исследования использовали образцы оолитовых железных руд Аятского и Лисаковского месторождений. Эксперименты проводились в закрытой печи Таммана с графитовым нагревателем, что обеспечивало создание восстановительной атмосферы в объеме печи. Согласно методике расчета [21] равновесный состав газовой фазы в рабочем пространстве печи с графитовым нагревателем при температуре 1000 °С и давлении 0,1 МПа составлял 34,58%  $\text{CO}$ , 0,07%  $\text{CO}_2$ , 65,35%  $\text{N}_2$ .

В рабочий объем печи установили 4 корундовых тигля (рис. 1), в которых находились образцы руды размером от 0,4 до 1,0 мм. Образцы руды в верхних тиглях взаимодействовали с оксидом  $\text{CO}$  газовой фазы, а в нижних тиглях находились в смеси с порошком графита и взаимодействовали также с твердым углеродом. Печь нагревали до температуры 1000 °С в течение 60 мин и выдерживали при этой температуре 5 ч. Температуру контролировали с помощью вольфрам-рениевой термопары ВР5/ВР20. При выборе температуры и времени выдержки опирались на результаты предыдущих экспериментов [18–20].

По окончании выдержки тигли с образцами охлаждали вместе с печью до комнатной температуры. Для удаления остатков углерода рассеивали смесь образцов с порошком графита и отбирали образцы для микро-рентгеноспектрального и рентгенофазового анализов.

Часть образцов заливали эпоксидной смолой, после чего их шлифовали и полировали. Полученные шлифы исследовали на электронном микроскопе JSM-6460LV

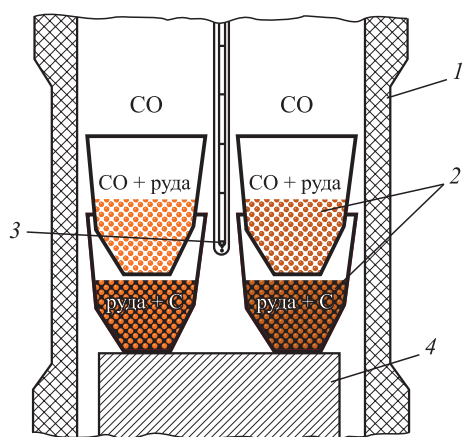


Рис. 1. Схема расположения тиглей с образцами руд в рабочем пространстве печи Таммана:

1 – графитовый нагреватель; 2 – тигли с образцами;  
3 – термопара; 4 – подставка

Fig. 1. Layout of crucibles with ore samples in working space of the Tamman furnace:

1 – graphite heater; 2 – crucibles with samples;  
3 – thermocouple; 4 – stand

фирмы JEOL с использованием энергодисперсионного анализатора фирмы Oxford Instruments для определения элементного состава в точках и по площади методом микрорентгеноспектрального анализа. Рентгенофазовый анализ (РФА) исходных и металлизированных образцов проводили на дифрактометре Rigaku Ultima IV. Полученные дифрактограммы расшифровывались с помощью программы Match! 3.

### РЕЗУЛЬТАТЫ ЭКСПЕРИМЕНТА

На рис. 2 показаны результаты РФА образцов исходных руд. Оба образца содержат гетит FeO(OH), магнетит Fe<sub>3</sub>O<sub>4</sub> и кварц SiO<sub>2</sub>. В руде Аятского месторождения фосфор присутствует в виде фосфата алюминия AlPO<sub>4</sub> и гидрофосфата железа FePO<sub>4</sub>·2H<sub>2</sub>O, а в образцах лисаковской руды – в составе гидрофосфата кальция CaHPO<sub>4</sub>·2H<sub>2</sub>O.

На рис. 3 представлены результаты РФА образцов после восстановительного обжига. На дифрактограмме образцов, восстановленных в атмосфере оксида СО

(рис. 3, а), наблюдается большее количество пиков и, соответственно, количество присутствующих фаз выше по сравнению с образцами, обожженными в контакте с порошком графита (рис. 3, б).

По результатам РФА во всех образцах присутствуют α-железо, магнетит Fe<sub>3</sub>O<sub>4</sub>, кварц SiO<sub>2</sub> и берленит AlPO<sub>4</sub>. В образцах, обожженных в атмосфере СО, фосфор присутствует в составе фосфатов железа и кальция, в виде FeP<sub>2</sub>O<sub>7</sub> и FePO<sub>4</sub>, CaP<sub>2</sub>O<sub>6</sub> и Ca<sub>3</sub>(PO<sub>4</sub>)<sub>2</sub> (рис. 3, а), в то время как в образцах, контактировавших с углеродом, фосфатов железа и кальция нет. В лисаковской руде обнаруживается оксид кальция СаО (рис. 3, б).

Исследование аншлифов обожженных руд показало, что как в контакте с углеродом, так и в атмосфере СО металлическая фаза железа образовалась и на поверхности, и внутри частиц руды (рис. 4), но восстановление твердым углеродом привело к образованию более четко очерченных плотных металлических структур (рис. 4, з).

В таблице представлены усредненные результаты микрорентгеноспектрального анализа содержания эле-

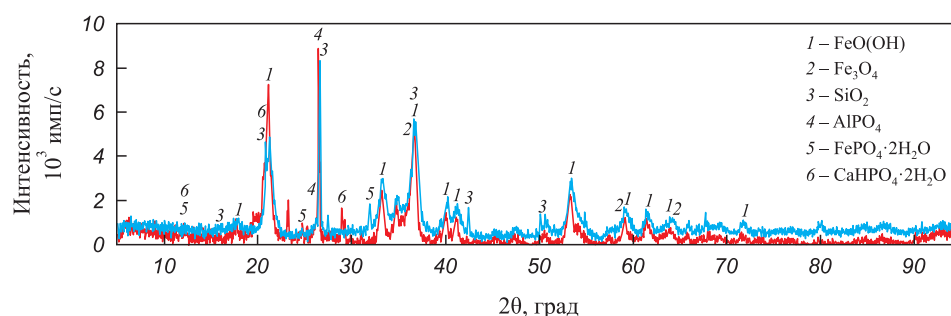


Рис. 2. Дифрактограммы образцов исходных руд Лисаковского (—) и Аятского (—) месторождений

Fig. 2. Diffractograms of samples of initial ores from Lisakovsky (—) and Ayat (—) deposits

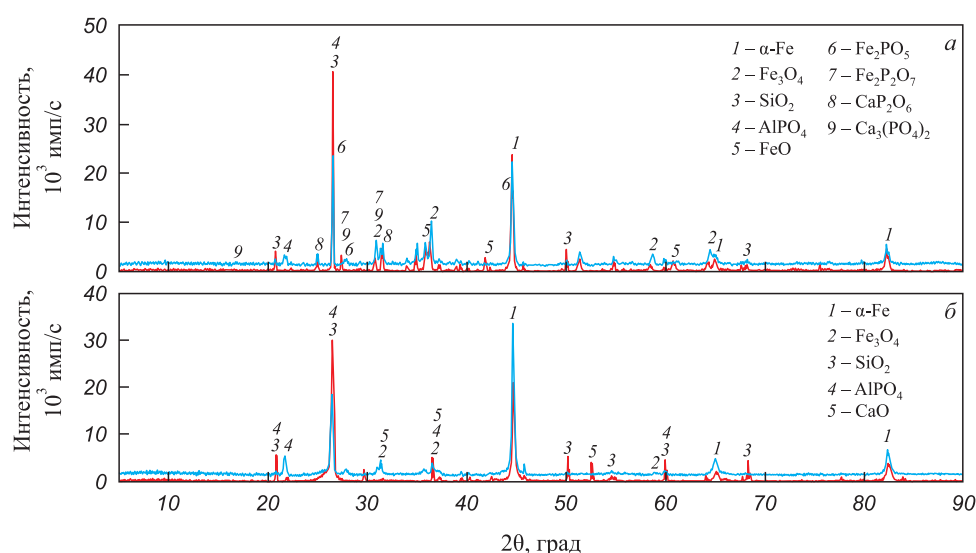


Рис.3. Дифрактограммы руд Лисаковского (—) и Аятского (—) месторождений после восстановительного обжига в атмосфере СО (а) и в контакте с твердым углеродом (б)

Fig.3. Diffractogram of the ores from Lisakovsky (—) and Ayat (—) deposits after reduction roasting in CO atmosphere (a) and in contact with solid carbon (b)



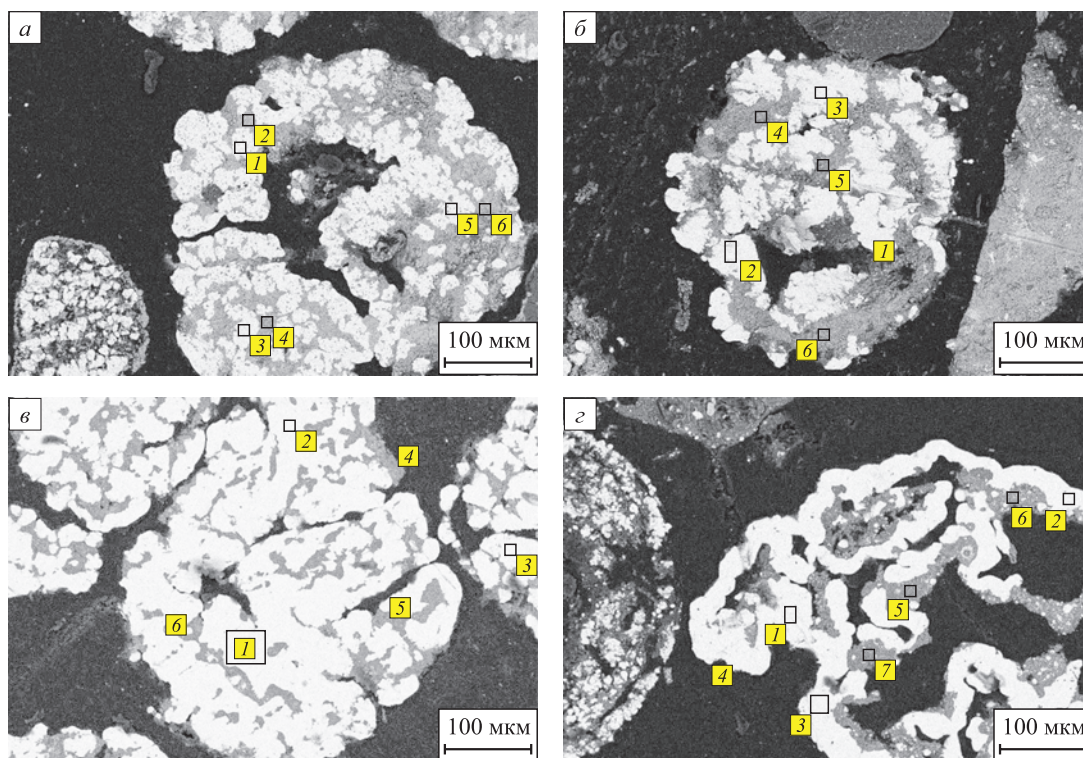


Рис. 4. Распределение металлических и неметаллических фаз в образцах руд Лисаковского (а, в) и Аятского (б, з) месторождений после восстановительного обжига в атмосфере CO (а, б) и в контакте с углеродом (в, з)

Fig. 4. Distribution of metallic and non-metallic phases in the samples of ores of Lisakovsky (a, в) and Ayat (б, з) deposits after reduction roasting in CO atmosphere (a, б) and in contact with carbon (в, з)

### Среднее содержание элементов по результатам анализа металлизированных образцов

#### Average content of elements according to results of the metallized samples analysis

Точки/участки анализа	Содержание элементов, % (ат.)							
	O	Mg	Al	Si	P	Ca	Mn	Fe
Спектр 1, 3, 5 (рис. 4, а)	–	–	–	–	0,1	–	–	99,9
Спектр 2, 4, 6 (рис. 4, а)	63,0	0,4	10,0	5,3	1,6	0,1	0,3	19,3
Спектр 1, 2, 3 (рис. 4, б)	–	–	–	–	0,1	–	–	99,9
Спектр 4, 5, 6 (рис. 4, б)	61,8	1,1	10,1	6,2	1,2	0,6	0,4	18,6
Спектр 1, 2, 3 (рис. 4, в)	–	–	–	–	3,5	–	–	96,5
Спектр 4, 5, 6 (рис. 4, в)	63,5	2,2	15,3	11,5	0,5	1,6	0,7	4,7
Спектр 1, 2, 3, 4 (рис. 4, з)	–	–	–	–	2,0	–	–	98,0
Спектр 5, 6, 7 (рис. 4, з)	63,5	1,3	15,3	9,2	0,2	2,8	0,6	7,1

ментов в точках и участках анализа в образцах металлизированных руд. Например, по результатам анализа участков 1, 3, 5 (рис. 4, а) среднее содержание фосфора составляет 0,1 %, железа – 99,9 % (ат.).

После обжига в контакте с углеродом в образцах обоих месторождений железо почти полностью восстанавливается (содержание в остаточных оксидах составляет 5 – 7 %), в то время как при восстановлении в атмосфере CO содержание железа в оксидной фазе сохраняется примерно на уровне 20 %. При этом в железе, восстановленном в атмосфере CO, содер-

жание фосфора в металле не превышает 0,1 %, тогда как после восстановления железа твердым углеродом содержание фосфора составляет 2,5 – 3,0 %.

### ОБСУЖДЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ

Результаты РФА показали, что исходные руды состоят из фаз гетита, магнетита, гидрофосфатов железа, кальция, кварца, фосфата алюминия. Во всех металлизированных образцах гетит исчезает, появляется фаза α-железа, а также остается фаза SiO<sub>2</sub>. Фосфор в образцах после вос-

становления в атмосфере CO присутствует в виде соединений  $\text{CaP}_2\text{O}_6$  или  $\text{Ca}_3(\text{PO}_4)_2$ ,  $\text{FePO}_4$  или  $\text{FeP}_2\text{O}_7$  и  $\text{AlPO}_4$ , в то время как в образцах, восстановленных углеродом, фосфор остается только в фазе  $\text{AlPO}_4$ . Фосфор в таких условиях восстанавливается из фосфатов кальция и железа и переходит в металл. Полученные результаты подтверждаются исследованием образцов на электронном микроскопе после восстановительного обжига. В образцах Аятского и Лисаковского месторождений после восстановления в атмосфере CO фосфор практически не восстановился, но в смеси с твердым углеродом фосфор восстанавливается и обнаруживается микрорентгеноспектральным анализом в металлической фазе.

Повышенное содержание фосфора в лисаковской руде не повлияло на ранее выявленные закономерности его восстановления, а только подтвердило полученные результаты. Таким образом, оксид углерода не восстанавливает фосфор из соединений оолитовых руд, но фосфор восстанавливается твердым углеродом.

Полученные результаты подтверждают возможность селективного восстановления железа оксидом углерода в оолитовых рудах с высоким содержанием фосфора разных месторождений.

## Выводы

Лисаковские и Аятские оолитовые руды близки по содержанию железа, но отличаются содержанием фосфора, который связан в гидрофосфаты кальция, железа и фосфаты алюминия. При температуре 1000 °C и выдержке в течение 5 ч оксид углерода не восстанавливает фосфор из гидрофосфатов железа и кальция, а также из фосфатов алюминия. При тех же условиях в контакте с твердым углеродом фосфор полностью восстанавливается и переходит в металлическую фазу из гидрофосфатов кальция и железа, но не восстанавливается из фосфата алюминия.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ / REFERENCES

- Smirnov K.I., Gamov P.A. Pyro-metallurgical processing of ilmenite concentrate with production of iron and titanium oxides. *Solid State Phenomena*. 2021;316:385–389. <https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/SSP.316.385>
- Smirnov K., Gamov P.A. Specific features of metal reduction from ilmenite concentrate. *AIP Conference Proceedings*. 2022;2456(1):020052. <https://doi.org/10.1063/5.0074718>
- Kosdauletov N.K., Roshchin V.R. Solid-phase reduction and separation of iron and phosphorus from manganese oxides in ferromanganese ore. *Defect and Diffusion Forum*. 2021;410:281–286. <https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/DDF.410.281>
- Li K., Ni W., Zhu M., Zheng M., Li Y. Iron extraction from oolitic iron ore by a deep reduction process. *Journal of Iron and Steel Research International*. 2011;18(8):9–13. [http://doi.org/10.1016/S1006-706X\(11\)60096-4](http://doi.org/10.1016/S1006-706X(11)60096-4)
- Sun Y.S., Han Y.X., Gao P., Wang Z.H., Ren D.Z. Recovery of iron from high phosphorus oolitic iron ore using coal-based reduction followed by magnetic separation. *International Journal of Minerals, Metallurgy, and Materials*. 2013;20(5):411–419. <https://doi.org/10.1007/s12613-013-0744-1>
- Zhou W., Han Y., Sun Y., Gao P., Li Y. Review of research on iron extraction and phosphorus reduction of high phosphorus oolitic hematite. *Metal Mines*. 2019;(2):10–11. <https://doi.org/10.19614/j.cnki.jsks.201902002>
- Zhou W., Han Y., Sun Y., Gao P., Li Y. Recycling iron from oolitic hematite via microwave fluidization roasting and magnetic separation. *Minerals Engineering*. 2021;164:106851. <https://doi.org/10.1016/j.mineng.2021.106851>
- Chandio A.D., Channa I.A., Shaik A.A., Madad S., Rizvi S.B.H., Shah A.A., Alhazaa A. Beneficiation of low-grade Dilband iron ore by reduction roasting. *Metals*. 2023;13(2):296. <https://doi.org/10.3390/met13020296>
- Wu S., Sun T., Kou J., Xu H. A new iron recovery and dephosphorization approach from high phosphorus oolitic iron ore via oxidation roasting-gas-based reduction and magnetic separation process. *Powder Technology*. 2023;413:118043. <https://doi.org/10.1016/j.powtec.2022.118043>
- Manieh A.A. Oolite liberation of oolitic iron ore, Wadi Fatima, Saudi Arabia. *International Journal of Mineral Processing*. 1984;13(3):187–192. [https://doi.org/10.1016/0301-7516\(84\)90002-4](https://doi.org/10.1016/0301-7516(84)90002-4)
- Abro M.M., Pathan A.G., Mallah A.H. Liberation of oolitic hematite grains from iron ore. *Mehran University Research, Journal of Engineering Technology*. 2011;30:329–338.
- El Sharkawi M.M., Mesaed A., Mortada M.E. *Stratigraphic Setting and Paleoenvironment of the Coniacian-Santonian Ironstones of Aswan, South Egypt*. 1996.
- Champetier Y., Hamdadou E., Hamdadou M. Examples of biogenic support of mineralization in two oolitic iron ores-Lorraine (France) and Gara Djebilet (Algeria). *Sedimentary Geology*. 1987;51(3-4):249–255. [https://doi.org/10.1016/0037-0738\(87\)90050-9](https://doi.org/10.1016/0037-0738(87)90050-9)
- Тигунов Л.П., Ануфриева С.И., Броницкая Е.С., Кривоконева Г.К., Соколова В.Н., Аликберов В.М., Сладкова Г.А., Файнштейн Г.Г., Паровинчак М.С. Современные технологические решения переработки железосодержащих руд Бакчарского месторождения. *Разведка и охрана недр*. 2010;(2):37–43. Tigonov L.P., Anufrieva S.I., Bronitskaya E.S., Krivokoneva G.K., Sokolova V.N., Alikberov V.M., Sladkova G.A., Fainshtein G.G., Parovinchak M.S. Modern technological decisions of processing ferriferous ores of the Bakcharysky deposit. *Razvedka i okhrana neдр*. 2010;(2):37–43. (In Russ.).
- Özdemir Ö., Deutsch E.R. Magnetic properties of oolitic iron ore on Bell Island, Newfoundland. *Earth and Planetary Science Letters*. 1984;69(2):427–441. [https://doi.org/10.1016/0012-821X\(84\)90201-2](https://doi.org/10.1016/0012-821X(84)90201-2)
- Сулеймен Б., Салихов С.П., Рощин В.Е. Изучение железных руд Аятского месторождения оолитового типа. *Горный информационно-аналитический бюллетень*. 2022;(10-1):50–58. [https://doi.org/10.25018/0236\\_1493\\_2022\\_101\\_0\\_50](https://doi.org/10.25018/0236_1493_2022_101_0_50)
- Suleimen B., Salikhov S.P., Roshchin V.E. Study of the iron ores of the Ayat deposit of the oolite-type. *Mining Information and Analytical Bulletin (Scientific and Technical Journal)*. 2022;(10-1):50–58. (In Russ.). [https://doi.org/10.25018/0236\\_1493\\_2022\\_101\\_0\\_50](https://doi.org/10.25018/0236_1493_2022_101_0_50)

17. Каскатаева К.Б., Кряжева Т.В., Садчиков А.В., Дьяконов В.В. Характеристика руд Лисаковского месторождения с целью их комплексной переработки. *Известия Томского политехнического университета. Инжиниринг георесурсов*. 2021;332(5):7–16.  
Kaskataeva K.B., Kryazheva T.V., Sadchikov A.V., D'yakonov V.V. Characteristics of ores of the Lisakovsky deposit for their complex processing. *Izvestiya Tomskogo politekhnicheskogo universiteta. Inzhiniring georesurov*. 2021;332(5):7–16. (In Russ.).
18. Салихов С.П., Сулеймен Б., Роцин В.Е. Селективное восстановление железа и фосфора из оолитовой руды. *Известия вузов. Черная металлургия*. 2020;63(7):560–567.  
<https://doi.org/10.17073/0368-0797-2020-7-560-567>

- Salikhov S.P., Suleimen B., Roshchin V.E. Selective reduction of iron and phosphorus from oolite ore. *Izvestiya. Ferrous Metallurgy*. 2020;63(7):560–567. (In Russ.).  
<https://doi.org/10.17073/0368-0797-2020-7-560-567>
19. Suleimen B., Salikhov S.P. Behavior of extrusion briquettes (Brex) and pellets from oolite iron ore in solid-phase metallization. *AIP Conference Proceedings*. 2022;2456(1):020054.  
<https://doi.org/10.1063/5.0075188>
20. Suleimen B., Salikhov S.P. Metallization of oolitic iron ore after oxidation firing. *Solid State Phenomena*. 2021;316:390–395.  
<https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/SSP.316.390>
21. Михайлов Г.Г., Леонович Б.И., Кузнецов Ю.С. *Термодинамика металлургических процессов и систем*. Москва: ИД МИСиС; 2009:520.

## Сведения об авторах

## Information about the Authors

**Бакыт Сулеймен**, научный сотрудник научно-исследовательской лаборатории «Водородные технологии в металлургии», Южно-Уральский государственный университет  
**ORCID:** bakysuleimen@mail.ru  
**E-mail:** 0000-0001-9306-1045

**Семен Павлович Салихов**, к.т.н., доцент кафедры пирометаллургических и литейных технологий, Южно-Уральский государственный университет  
**ORCID:** salikhovsp@susu.ru  
**E-mail:** 0000-0002-8818-0450

**Фарход Шукурович Шарипов**, магистрант кафедры пирометаллургических и литейных технологий, Южно-Уральский государственный университет  
**E-mail:** saripovf17@mail.ru

**Василий Ефимович Роцин**, д.т.н., профессор кафедры пирометаллургических и литейных технологий, Южно-Уральский государственный университет  
**ORCID:** 0000-0003-3648-8821  
**E-mail:** roshchinve@susu.ru

**Bakyt Suleimen**, Research Associate of the Research Laboratory “Hydrogen Technologies in Metallurgy”, South Ural State University  
**ORCID:** bakysuleimen@mail.ru  
**E-mail:** 0000-0001-9306-1045

**Semen P. Salikhov**, Cand. Sci. (Eng.), Assist. Prof. of the Chair of Pyrometallurgical and Foundry Technologies, South Ural State University  
**ORCID:** salikhovsp@susu.ru  
**E-mail:** 0000-0002-8818-0450

**Farkhod Sh. Sharipov**, MA Student of the Chair of Pyrometallurgical and Foundry Technologies, South Ural State University  
**E-mail:** saripovf17@mail.ru

**Vasilii E. Roshchin**, Dr. Sci. (Eng.), Prof. of the Chair of Pyrometallurgical and Foundry Technologies, South Ural State University  
**ORCID:** 0000-0003-3648-8821  
**E-mail:** roshchinve@susu.ru

## Вклад авторов

## Contribution of the Authors

**Б. Сулеймен** – аналитический обзор, проведение экспериментов, определение химического и фазового составов образцов, подготовка текста и иллюстраций статьи.

**С. П. Салихов** – постановка и решение задачи, анализ результатов эксперимента, редактирование текста и иллюстраций.

**Ф. Ш. Шарипов** – графическое оформление полученных результатов, проведение экспериментов.

**В. Е. Роцин** – научное руководство исследованиями, формирование цели исследования и выводов по результатам экспериментов.

**B. Suleimen** – analytical data review, conducting experiments, determining chemical and phase composition of the samples, preparing the text and illustrations.

**S. P. Salikhov** – statement and solution of the task, analysis of the experimental results, editing of the text and illustrations.

**F. Sh. Sharipov** – graphic presentation of the results, conducting experiments.

**V. E. Roshchin** – scientific guidance, formation of the goal of the study and conclusions based on the experimental results.

Поступила в редакцию 14.03.2023  
После доработки 19.06.2023  
Принята к публикации 28.06.2023

Received 14.03.2023  
Revised 19.06.2023  
Accepted 28.06.2023