

## УКРУПНЕНИЕ НИЗКОРАЗМЕРНЫХ БЛАГОРОДНЫХ МЕТАЛЛОВ ИЗ УГЛЕРОДИСТЫХ МАТЕРИАЛОВ С ПРИМЕНЕНИЕМ МИКРОВОЛНОВОЙ ОБРАБОТКИ

А.В. Афанасова<sup>1</sup>, В.А. Абурова<sup>1</sup>

<sup>1</sup> Санкт-Петербургский горный университет императрицы Екатерины II,  
Санкт-Петербург, Россия, e-mail: Afanasova\_av@pers.spmi.ru

**Аннотация:** Разработка новых эффективных технологических решений в области переработки благороднометалльных руд является актуальной задачей ввиду снижения качества руд и вовлечения в переработку месторождений упорных руд и руд двойной упорности, извлечение благородных металлов из которых зачастую неэффективно. Перспективным направлением для повышения извлечения ценных компонентов является применение физико-энергетических методов воздействия на сырье, таких как микроволновая обработка, обладающих таким преимуществом, как возможность избирательного нагрева. Объектом исследования являлась сульфидная углеродистая золотосодержащая руда. На примере полученных углеродистых флотационных концентратов обоснована возможность укрупнения низкоразмерных структур благородных металлов с применением микроволнового воздействия и добавлением магнетита для создания активных центров локального нагрева. Показано укрупнение частиц благородных металлов до размеров 40–60 мкм, что делает возможным их дальнейшее извлечение. Исследование влияния микроволновой обработки на пустую породу в составе флотационного концентрата, на примере кварца и кальцита, позволило установить увеличение свободной поверхностной энергии образцов. Определено влияние микроволнового нагрева на частицы пирита, показан переход сульфидов железа в оксиды железа за счет их десульфидизации. При этом частицы сульфидных минералов железа в течение обработки также могут стать активными центрами локального нагрева и дополнительно способствовать укрупнению частиц благородных металлов.

**Ключевые слова:** микроволновая обработка, углеродистое сырье, упорные руды, флотация, низкоразмерное золото, углеродистое вещество, благородные металлы, сульфидные минералы.

**Благодарность:** Работа выполнена при поддержке Российского научного фонда (проект № 23-47-00109).

**Для цитирования:** Афанасова А. В., Абурова В. А. Укрупнение низкоразмерных благородных металлов из углеродистых материалов с применением микроволновой обработки // Горный информационно-аналитический бюллетень. – 2024. – № 1. – С. 20–35. DOI: 10.25018/0236\_1493\_2024\_1\_0\_20.

---

## Growth of low-dimensional structure noble metals in carbonaceous materials under microwave treatment

A.V. Afanasova<sup>1</sup>, V.A. Aburova<sup>1</sup>

<sup>1</sup> Empress Catherine II Saint-Petersburg Mining University, Saint-Petersburg, Russia,  
e-mail: Afanasova\_av@pers.spmi.ru

---

**Abstract:** Development of new and efficient technologies in the field of processing of noble metal-bearing ores is a topical task because of quality degradation of ore materials and due to involvement of refractory and double refractory ore into production, which makes extraction of noble metals from such ore ineffective. A promising trend of enhanced recovery of valuable components is high-energy deposition techniques, such as microwave treatment, which are advantageous for selective heating. The test subject of this study is carbonaceous sulfidic gold ore. In terms of the produced carbonaceous concentrates of flotation, the substantiation is provided for the possible growth of low-dimensional structure noble metals using microwave treatment with addition of magnetite to create active centers of local heating. It is shown that it is possible to grow noble metal particles to the sizes of 40–60  $\mu\text{m}$ , which enables their recovery. The analysis of the effect exerted by microwave treatment on barren rocks in composition of flotation concentrates in terms of quartz and calcite disclosed an increase in the free surface energy of the test samples. The influence of microwave heating on pyrite particles is determined, the transition of iron sulfides to iron oxides owing to desulfurization is described. The particles of sulfidic metals can also become active centers of local heating during treatment and facilitate growth of noble metal particles.

**Key words:** microwave treatment, carbonaceous raw material, refractory ore, flotation, low-dimensional structure gold, carbonaceous matter, noble metals, sulfidic minerals.

**Acknowledgements:** The study was supported by the Russian Science Foundation, Project No. 23-47-00109.

**For citation:** Afanasova A. V., Aburova V. A. Growth of low-dimensional structure noble metals in carbonaceous materials under microwave treatment. *MIAB. Mining Inf. Anal. Bull.* 2024;(1):20-35. [In Russ]. DOI: 10.25018/0236\_1493\_2024\_1\_0\_20.

---

### Введение

Сырьевой комплекс является неотъемлемой частью мировой экономики [1]. Россия располагает не только значительной сырьевой базой, но и развитой золотодобывающей промышленностью. Именно это позволяет поддерживать текущий уровень мирового лидерства по производству драгоценного металла.

Ввиду снижения качества золотосодержащих руд, вовлечения в переработку упорных руд возрастает необходимость разработки новых эффективных технологических решений для повыше-

ния извлечения ценных компонентов [2–4].

Существующие на сегодняшний день исследования в области обогащения полезных ископаемых направлены на повышение эффективности процесса дезинтеграции [5, 6], применение машинного зрения в процессах обогащения [7, 8], разработку новых реагентных режимов [9–11], создание новых подходов к оценке флотационного процесса [12] и использование пневматических методов обогащения [13]. Основным способом обогащения золотосодержащих руд яв-

ляется флотация, интенсификация которой является актуальным направлением [14–16]. Переработка упорных руд, упорность которых заключается в наличии углеродистого вещества, проявляющего активность по отношению к раст-

воренному золоту, снижает эффективность металлургического передела [17].

Существующими способами обезуглероживания являются использование гравитационных центробежных концентраторов, обесшламливание, применение

Таблица 1

**Сводные данные по температуре превращений, удельной теплоемкости, удельной теплопроводности, относительной диэлектрической проницаемости, фазовым переходам некоторых рудных и породообразующих минералов**  
**Summary data on transformation temperatures, specific heat capacity, specific thermal conductivity, relative permittivity, phase transitions of some ore and gangue minerals**

Минерал	Температура превращений минералов, °С	$C_p$ Дж/(кг·К)	$\lambda$ , Вт/(м·К)	$\varepsilon$	Фазовые переходы при термической обработке (температура плавления)	Ссылки
Пирит	600–689 (р.) 1100 (пл.)	0,5–0,52	23–38	20–81	491–549 °С термическое разложение пирита с образованием элементарной серы > 549 °С разложение пирита – пирротин, незначительное количество магнетита	[24], [25]
Арсенопирит	430 (р.) 675–685 (пл.)	0,4	~0,4	>81	переход арсенпирита в пирротин при микроволновой обработке (5 кВт, 10 мин)	[24], [26]
Гематит	1350–1360 (р.) 1400–1565 (пл.)	0,62	11,2–13,9	10–25	восстановление гематита до железа при микроволновой обработке (3 кВт, > 6 мин)	[24], [27]
Магнетит	1145–1260 (р.) 1538 (пл.)	0,6	4,7–5,28	34–81	350 °С начало фазового превращения магнетит–гематит 700–750 °С 80–85% переход магнетита в гематит	[24], [28]
Кварц	1470 (р.) 1600–1670 (пл.)	~0,74	8,0–13,0	4,5–6,2	573 °С $\alpha$ -кварц переходит в $\beta$ -кварц 870 °С $\beta$ -кварц переходит в $\beta$ -тридимит 1470 °С $\beta$ -тридимит переходит в $\beta$ -кристобалит	[24], [29]
Кальцит	880–920 (р.) 1750–1787 (пл.)	0,8–0,83	3,25–3,9	3,5–8,5	648 °С начало разложения кальцита 893 °С достигается 97,2% разложение кальцита	[24], [30]
Золото	1064 (пл.) ~2700 (к.)	0,125–0,145	310	–	* 257,85 °С – температура плавления кластера золота диаметром 1,6 нм * 318,85 °С – температура плавления кластера золота диаметром 1,9 нм	[24], [31], [32]

селективных депрессоров и углеродистая флотация. Основным недостатком применяемых технологий обезуглероживания являются потери низкоразмерных структур благородных металлов, что предопределяет необходимость разработки новых решений для снижения потерь благородных металлов.

Перспективным направлением является применение физико-энергетических методов воздействия на сырье. Существующие исследования показывают хорошую возможность использования магнито-импульсных, ультразвуковых, плазменных, микроволновых воздействий [18 – 20]. Применение воздействий на различных стадиях переработки сырья позволяет повысить раскрываемость сростков, извлечение ценных компонентов, эффективность процессов выщелачивания [21 – 23].

Микроволновая обработка обладает рядом преимуществ, основным из которых является возможность избирательного нагрева рудных частиц, что применяется преимущественно при использовании микроволнового воздействия для повышения раскрываемости сростков на стадии рудоподготовки. По скорости нагрева под микроволновым воздействием минералы подразделяются по способности поглощать микроволны и избирательно нагреваться. В табл. 1 представлены сводные данные по температуре превращений (р. — разложение, пл. — плавление), удельной теплоемкости ( $C_T$ ), удельной теплопроводности ( $\lambda$ ), относительной диэлектрической проницаемости ( $\epsilon$ ), фазовым переходам при термической обработке минералов, как рудных, так и минералов пустой породы.

Стоит отметить (см. табл. 1), что самыми активными минералами по отношению к микроволновому нагреву являются минералы железа, как группы сульфидов, так и группы оксидов. Однако свойства минералов под воздейст-

вием микроволнового излучения достаточно слабо изучены.

Таким образом, целью представленной работы является обоснование возможности укрупнения низкоразмерных частиц золота с применением микроволнового воздействия путем добавления магнетита для создания активных центров локального нагрева и установление влияния микроволнового воздействия на компоненты углеродистого флотационного концентрата.

### **Материалы и методы исследования**

Объектом исследования в работе была выбрана сульфидная золотосодержащая руда, относящаяся к категории двойной упорности ввиду тонкой вкрапленности золота в минералы-концентраторы и наличия углеродистого вещества, характеризующегося сорбционной активностью по отношению к растворенному золоту. Минеральный состав руды представлен на рис. 1.

Рудная минерализация представлена преимущественно пиритом и арсенопиритом, основными минералами-концентраторами золота, присутствует антимонит, являющийся концентратором серебра. Золото в исследуемом объекте относится к категории «невидимого золота» и не обнаруживается с применением сканирующей электронной или оптической микроскопии. Золото присутствует в ультрадисперсной (коллоидной) форме, часто в субмикроскопической форме ( $<0,1 \mu\text{м}$ ). Ценным компонентом является золото, содержание которого составляет  $5,90 \pm 0,2 \text{ г/т}$ . Содержание органического углерода в руде составляет 1,6%.

Для обоснования возможности укрупнения низкоразмерных частиц благородных металлов с применением микроволнового воздействия были поставлены следующие задачи:

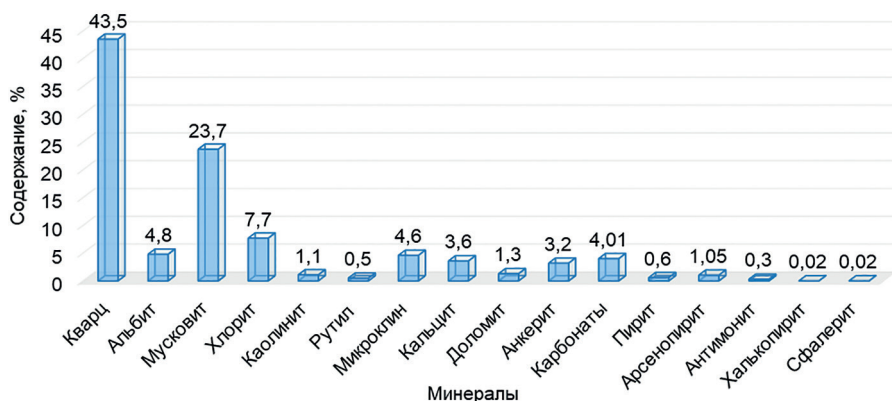


Рис. 1. Минеральный состав сульфидной золотосодержащей руды

Fig. 1. Mineral composition of sulfide gold-bearing ore

- получение углеродистых флотационных концентратов и их анализ с применением сканирующей электронной микроскопии;

- исследование влияния микроволнового воздействия на рудные и порообразующие минералы, входящие в состав флотационного концентрата, на примере пирита, кварца и кальцита;

- исследование возможности укрупнения низкоразмерных частиц благородных металлов с применением микроволнового воздействия с добавлением магнетита для создания активных центров локального нагрева.

Опыты флотационного обогащения проводились на флотационной машине Laarmann Flotation Bench Test Machine на камере объемом 1,5 л. Для флотации использовалась руда, измельченная до крупности 55% класса –71 мкм. Для флотации углеродистого вещества, ввиду его невысокого содержания и природной гидрофобности, был использован только пенообразователь оксаль с расходом 85 г/т. Полученные флотационные концентраты подвергались обезвоживанию и сушке, после чего их отправляли на анализ.

Для исследований влияния микроволнового воздействия также были использованы образцы мономинералов кварца,

кальцита и пирита. Микроволновая обработка проб проводилась в микроволновой установке Sineo. Исследование свободной поверхностной энергии проводилось по методу ОВРК [33], с использованием в качестве полярной и неполярной жидкости воды и дийодометана. Анализ образцов до и после микроволновой обработки был проведен с применением рентгенофлуоресцентного анализатора Shimadzu EDX 7000, анализатора органического углерода TOC-L Shimadzu, оптического микроскопа Axio Imager A2m Zeiss, сканирующего электронного микроскопа Vega 3 LMN, совмещенного с системой рентгеновского энергодисперсионного микроанализа Oxford Instruments INCA Energy 250/X-max 20, науглероживание проводилось с целью минимизации засвечивания частиц при помощи установки Q150R E производства Quorum Technologies Ltd.

## Результаты и обсуждения

*Получение углеродистых флотационных концентратов (УФК) и анализ полученных продуктов с применением сканирующей электронной микроскопии*

В результате флотационного обогащения были получены углеродистые фло-

Таблица 2

**Результаты флотационного обогащения**  
**Flotation beneficiation results**

Наименование продукта	Выход, %	Содержание, % (г/т)				
		Au <sup>*</sup>	As	Si	Ca	C <sub>орг</sub>
Углеродистый концентрат	2,45	2,95	0,23	24,10	1,40	28,01
Хвосты	97,55	5,97	0,45	29,98	1,19	1,24
Исходная руда	100,00	5,90	0,45	29,30	1,50	1,60
Наименование продукта		Извлечение, %				
		Au	As	Si	Ca	C <sub>орг</sub>
Углеродистый концентрат		1,23	1,51	0,19	22,49	24,51
Хвосты		98,78	98,49	99,81	77,51	75,49
Исходная руда		100,00	100,00	100,00	100,00	100,00

Таблица 3

**Результаты исследования элементного состава спектров для рис. 3**  
**Results of the research on the elemental composition of the spectra for Fig. 3**

Номер спектра	Содержание, вес. %								
	O	C	Al	Si	Fe	S	As	Cu	Sb
Спектр 3	59,36		0,23	13,42	12,89	13,34	0,76		
Спектр 4	51,54	25,01	1,74	2,30	3,46	8,59		0,05	7,31

тационные концентраты, элементный состав которых по основным элементам приведен в табл. 2. В качестве элементов выбраны Au, As, Si, Ca и C<sub>орг</sub> как основные составляющие минералов-концентратов золота и минералов пустой породы.

Хвосты углеродистой флотации по классической технологии переработки данного типа руд поступают на доизмельчение и сульфидную флотацию, углеродистые концентраты при этом поступают на хвостохранилище и не вовлекаются в переработку. Углеродистая флотация является достаточно эффективным методом снижения содержания углеродистого вещества в сульфидном концентрате, извлечение органического углерода в углеродистый концентрат составляет 24,51%, однако потери золота с ним составляют 1,23% (табл. 2). Полученный УФК анализировался с применением сканирующей электронной микроскопии.

Результаты исследования приведены на рис. 2 и 3.

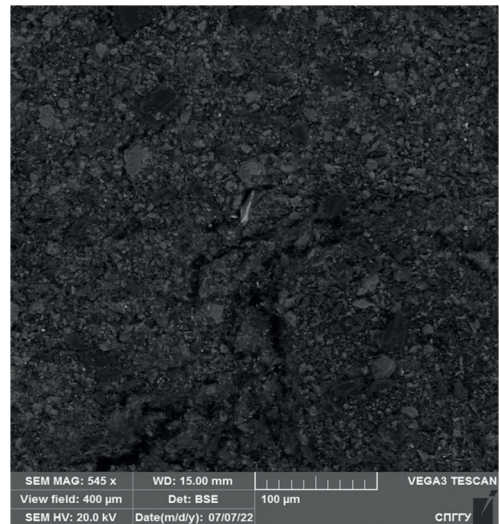


Рис. 2. Общий вид УФК, полученный с применением сканирующей электронной микроскопии  
 Fig. 2. General view CFC obtained by using scanning electron microscopy



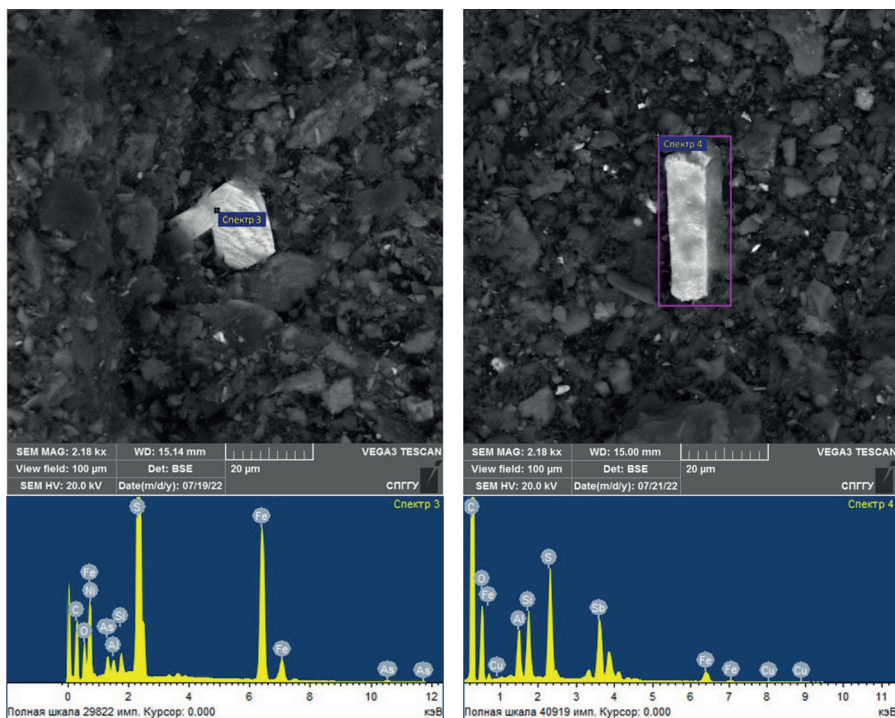


Рис. 3. Результаты исследования УФК с применением сканирующей электронной микроскопии  
 Fig. 3. Results from the research of the CFC using scanning electron microscopy

Результаты исследования элементного состава спектров приведены в табл. 3.

Углеродистый флотационный концентрат состоит преимущественно из углеродистого вещества и некоторого количества пустой породы. Анализ данных показывает, что в УФК содержится незначительно количество сульфидных минералов, что показано на рис. 3. Для обоснования возможности укрупнения низкоразмерных частиц благородных металлов необходимо исследование влияния микроволновой обработки на компоненты, составляющие УФК.

*Исследование влияния микроволнового воздействия на рудные и породообразующие минералы, входящие в состав флотационного концентрата*

Исследование влияния микроволнового воздействия на углеродистое веще-

ство приведено в работе [34] и показывает деструкцию сорбционно-активной углеродистой составляющей. Для исследования влияния на породообразующие и рудные минералы в составе УФК были проведены опыты микроволнового воздействия на минералы: пирит, кальцит и кварц.

Применение микроволнового нагрева для таких минералов, как кварц и кальцит, не приводит к их значительному нагреву. Обработка образцов в течение 5 мин при мощности 1,0 кВт привела к нагреву менее чем до 100 °С. В исследуемом диапазоне воздействия не было отмечено изменений элементного состава образцов. Оценка влияния микроволнового нагрева была проведена с позиции исследования свободной поверхностной энергии до и после воздействия. Результаты приведены в табл. 4; замер каждого значения краевого угла смачи-

Таблица 4

**Результаты исследования влияния микроволнового воздействия на поверхностные свойства кварца и кальцита****Results of the research on the effect of microwave treatment on the surface properties of quartz and calcite**

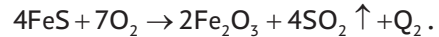
Минерал	Микроволновая обработка	$\theta_B$ , град.	$\theta_D$ , град.	$\sigma$ , мН/м	$\sigma^D$ , мН/м	$\sigma^P$ , мН/м
Кварц	без обработки	65,97	67,63	39,86	24,20	15,66
	после обработки	59,12	61,54	41,62	31,71	9,91
Кальцит	без обработки	74,62	53,10	39,93	32,53	7,40
	после обработки	55,96	54,50	49,94	31,73	18,21

вания проводился десять раз, в таблице приведены усредненные значения.

Анализ результатов, приведенных в табл. 4, показывает, что микроволновая обработка приводит к увеличению свободной поверхностной энергии как кварца, так и кальцита. При этом для кварца изменение менее значительное, с 39,89 до 41,62 мН/м, в то время как для кальцита СПЭ увеличивается с 39,93 до 49,94 мН/м. Увеличение свободной поверхностной энергии также отмечается с применением низкотемпературных воздействий [33]. Без обработки данные минералы характеризуются повышенной флотационной активностью, что было ранее установлено в работе [14].

Анализ литературных источников по исследованию термического воздействия на пирит показал фазовый переход пирита в пирротин, магнетит и далее в гематит [25, 28, 35]. Пирит представля-

ет собой гранецентрированную решетку, в которой ионы серы располагаются парами и при этом сильно сближены между собой с образованием анионной группы. Согласно данным, приведенным в работе [28], пирит перестает находиться в равновесном состоянии при температуре выше 400 °С, происходит разрушение кристаллической решетки с образованием FeS, после чего происходит окисление до оксида железа. В работе [36] приведены следующие реакции:



Проведенные исследования влияния микроволнового нагрева на частицы пирита позволили установить переход пирита в оксиды железа. Результаты представлены на рис. 4.

Стадии перехода соответствуют следующему времени обработки: 1 — об-

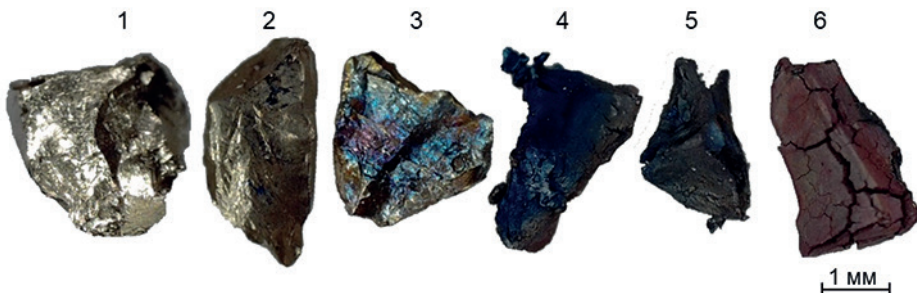


Рис. 4. Изменение пирита в процессе микроволновой обработки (1–6 — стадии перехода)

Fig. 4. Pyrite modification in the process of microwave treatment (1–6 — stages of transition)



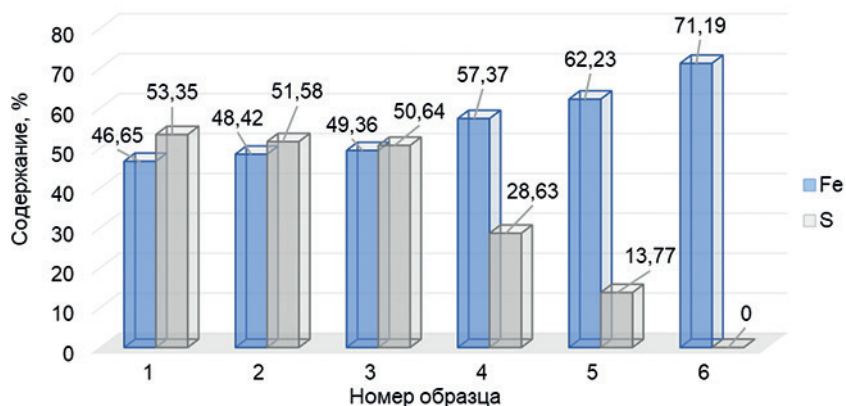


Рис. 5. Изменение элементного состава пирита в процессе микроволновой обработки  
 Fig. 5. Changes in the elemental composition of pyrite during microwave treatment

разец до обработки; 2 – 30 с; 3 – 60 с; 4 – 90 с; 5 – 120 с; 6 – 180 с.

Интерпретация полученных результатов позволяет установить возможность фазового перехода пирита в оксиды железа в процессе нагрева. На рис. 5 представлены результаты исследования элементного состава частиц в зависимости от времени микроволновой обработки при мощности 1,0 кВт и времени обработки 3 мин. Номера образцов соответствуют стадиям перехода, указанным выше.

Интерпретация полученных данных позволяет установить, что в процессе нагрева происходит десульфидизация пирита и фазовый переход сульфидных минералов железа (пирит, пирротин) в оксиды железа (магнетит, гематит). Частицы сульфидных минералов железа при этом в течение обработки также могут стать активными центрами локального нагрева и дополнительно способствовать укрупнению частиц благородных металлов. Содержание сульфидных минералов в углеродистом флотационном концентрате незначительное, однако возможным вариантом нейтрализации образующихся в процессе обработки газообразных соединений серы является технология SNOX [28].

#### Исследование возможности укрупнения низкоразмерных частиц благородных металлов с применением микроволнового воздействия

Проведенные исследования влияния микроволнового нагрева на минералы позволили обосновать добавление магнетита в навеску УФК для создания активных центров локального нагрева [33, 37]. Зерна пирита при этом в процессе нагрева за счет десульфидизации также могут быть дополнительными точками нагрева.

Опыты микроволновой обработки были проведены с добавлением 10% магнетита по отношению к массе навески. Время обработки при этом составило 5 мин при мощности установки 1 кВт. Результаты анализа проб с применением сканирующей электронной микроскопии приведены на рис. 6.

Для спектров, представленных на рис. 6, данные элементного состава приведены в табл. 5.

Анализ полученных данных позволяет обосновать возможность укрупнения низкоразмерных частиц благородных металлов. Добавление магнетита в процессе нагрева приводит к образованию локальных центров активного нагрева,

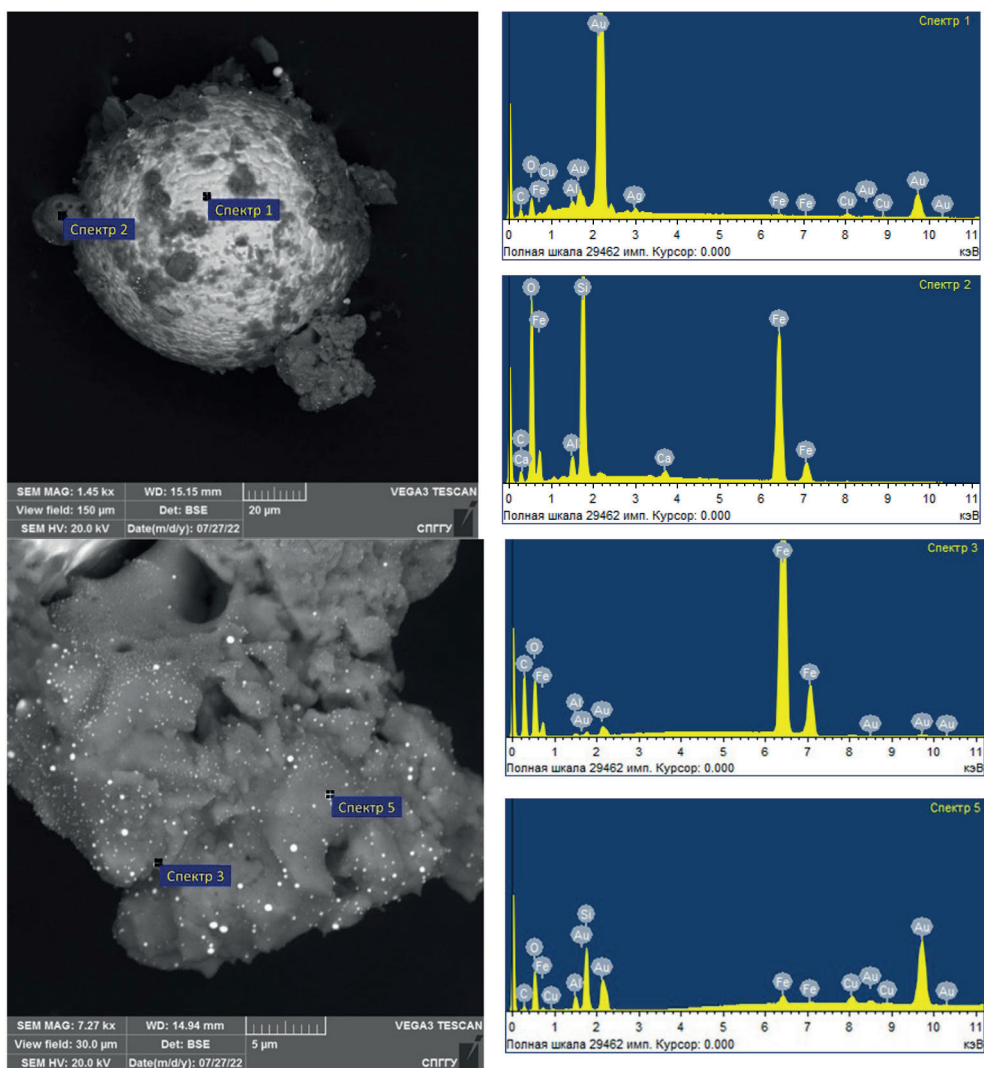


Рис. 6. Укрупненные частицы благородных металлов после микроволновой обработки  
 Fig. 6. Coarse particles of noble metals after microwave treatment

Таблица 5

**Результаты исследования элементного состава для спектров, представленных на рис. 6**  
**Elemental composition results for the spectra presented in Fig. 6**

Номер спектра	Содержание, вес. %							
	O	Al	Si	Fe	Au	Cu	Ca	Ag
Спектр 1	22,12	0,43	4,78	0,30	69,53	1,37		1,47
Спектр 2	50,02	1,18	13,32	34,92			0,56	
Спектр 3	43,76	0,08		43,53	12,63			
Спектр 5	17,95	0,27		5,21	75,40			1,17

вблизи которых происходит укрупнение частиц. Отмечено, что вместе с золотом в укрупненные частицы входит серебро, что показано в табл. 5. Отмечается, что укрупнение частиц наблюдается как до крупных агрегатов, размером более 50 мкм, так и в скоплении частиц размером порядка нескольких мкм. Таким образом, подтверждается укрупнение частиц «невидимого золота».

Наиболее вероятным механизмом является дефект Френкеля, когда атом вследствие нагрева покидает место в кристаллической решетке и переходит в междоузлие или межзерновое пространство [33]. Происходит перемещение атомов в кристаллической решетке, что приводит к возникновению дефектов (вакансий) и далее к увеличению внутренней энергии кристалла. Для снижения энергии происходит укрупнение частиц благородных металлов. Это хорошо согласуется с данными об уменьшении температуры плавления частиц золота по мере уменьшения размеров [31, 32]. Укрупнение низкоразмерных частиц дает возможность вовлечения в переработку хвостов углеродистой флотации, что позволит снизить экологическую нагрузку и повысить извлечение «невидимого золота» за счет его укрупнения.

### **Заключение**

В результате проведенных исследований обоснована возможность укрупнения низкоразмерных частиц благородных

металлов с применением микроволновой обработки. Добавление магнетита, в количестве 10% от массы навески, позволяет при этом создать активные центры локального нагрева, вблизи которых отмечается укрупнение частиц. Наиболее вероятным механизмом укрупнения является дефект Френкеля. Укрупнение частиц благородных металлов позволит повысить извлечение золота за счет вовлечения в переработку углеродистых концентратов флотации.

Исследование влияния микроволновой обработки на минералы пустой породы, на примере кварца и кальцита, позволяет определить влияние обработки на поверхность минералов за счет увеличения свободной поверхностной энергии минералов. Значительного нагрева минералов пустой породы вследствие нагрева не происходит. Исследование влияния микроволновой обработки на пирит позволило установить, что при мощности микроволнового воздействия 1,0 кВт и времени обработки 3 мин происходит переход пирита в оксиды железа за счет десульфидизации. Частицы сульфидных минералов железа при этом в течение обработки также могут стать активными центрами локального нагрева.

Авторы выражают благодарность научному руководителю, зав. каф. ОПИ Санкт-Петербургского горного университета, д.т.н., профессору Александровой Татьяне Николаевне.

### **СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ**

1. *Litvinenko V. S., Sergeev I. B.* Innovations as a factor in the development of the natural resources sector // *Studies on Russian Economic Development*. 2019, vol. 30, no. 6, pp. 637 – 645. DOI: 10.1134/S107570071906011X.
2. *Petrov G. V., Fokina S. B., Boduen A. Y., Zotova I. E., Fidarov B. F.* Arsenic behavior in the autoclave-hydrometallurgical processing of refractory sulfide gold-platinum-bearing products // *International Journal of Engineering and Technology (UAE)*. 2018, vol. 7, no. 2, pp. 35 – 39. DOI: 10.14419/ijet.v7i2.2.9897.

3. Федотов П. К., Сенченко А. Е., Федотов К. В., Бурдонов А. Е. Исследования обогатимости сульфидных и окисленных руд золоторудных месторождений Алданского щита // Записки Горного института. – 2020. – Т. 242. – С. 218–227. DOI: 10.31897/PMI.2020.2.218.

4. Александрова Т. Н., О'Коннор С. Переработка платинометаллических руд в России и Южной Африке: состояние и перспективы // Записки Горного института. – 2020. – Т. 244. – С. 462–473. DOI: 10.31897/рmi.2020.4.9.

5. Ефимов Д. А., Господариков А. П. Техничко-технологические аспекты использования валков с профилем в форме треугольника Рело в дробящих агрегатах на рудоподготовительном переделе // Горный информационно-аналитический бюллетень. – 2022. – № 10-2. – С. 117–126. DOI: 10.25018/0236\_1493\_2022\_102\_0\_117.

6. Aleksandrova T., Nikolaeva N., Lieberwirth H., Aleksandrov A. Selective desintegration and concentration: Theory and practice // E3S Web of Conferences. 2018, vol. 56, article 03001. DOI: 10.1051/e3sconf/20185603029.

7. Ромашев А. О., Николаева Н. В., Гатиатуллин Б. Л. Формирование адаптивного подхода с применением технологии машинного зрения для определения параметров осаждения продуктов обогащения // Записки Горного института. – 2022. – Т. 256. – С. 677–685. DOI: 10.31897/PMI.2022.77.

8. Islamov S., Grigoriev A., Beloglazov I., Savchenkov S., Gudmestad O. T. Research risk factors in monitoring well drilling – A case study using machine learning methods // Symmetry. 2021, vol. 13, no. 7, article 1293. DOI: 10.3390/sym13071293.

9. Яковлева Т. А., Ромашев А. О., Машевский Г. Н. Оптимизация дозирования флотационных реагентов при флотации руд цветных металлов с применением цифровых технологий // Горный информационно-аналитический бюллетень. – 2022. – № 6-2. – С. 175–188. DOI: 10.25018/0236\_1493\_2022\_62\_0\_175.

10. Юшина Т. И., Малышев О. А., Щелкунов С. А. Флотация золотосодержащих руд цветных металлов с применением реагентов на основе ацетиленовых спиртов // Цветные металлы. – 2017. – № 2. – С. 13–19. DOI: 10.17580/tsm.2017.02.01.

11. Owusu C., Agorhom E. A., Fosu S., Budu-Arthur E. Adsorption studies of sulphidic refractory gold ore // Powder Technology. 2020, vol. 375, pp. 310–316. DOI: 10.1016/j.powtec.2020.07.063.

12. Aleksandrova T. N., Kuznetsov V. V. A new approach to determining aeration intensity in flotation // Journal of Mining Science. 2022, vol. 58, no. 5, pp. 812–822.

13. Zhou C., Zhao Y., Liu C., Li Y., Gao Z., Fan X., Aleksandrova T., Duan C. Fluidization expansion of novel generation dense medium and flow regime transition in gas-solid separation fluidized bed // Fundamental Research. 2023. DOI: 10.1016/j.fmre.2023.02.008.

14. Афанасова А. В., Абурова В. А., Прохорова Е. О., Лушина Е. А. Исследование влияния депрессоров на флотоактивные породобразующие минералы при флотации сульфидных золотосодержащих руд // Горный информационно-аналитический бюллетень. – 2022. – № 6-2. – С. 161–174. DOI: 10.25018/0236\_1493\_2022\_62\_0\_161.

15. Иваник С. А., Илюхин Д. А. Флотационное выделение элементарной серы из золотосодержащих кеков // Записки Горного института. – 2020. – Т. 242. – С. 202–208. DOI: 10.31897/PMI.2020.2.202.

16. Александрова Т. Н., Кузнецов В. В., Иванов Е. А. Исследование влияния ионов жесткости воды на флотируемость медно-никелевых руд // Горный информационно-аналитический бюллетень. – 2022. – № 6-1. – С. 263–278. DOI: 10.25018/0236\_1493\_2022\_61\_0\_263.

17. Захаров Б. А., Меретуков М. А. Золото: упорные руды. – М.: ИД «Руда и Металлы», 2013. – 452 с.

18. Chanturiya V. A., Bunin I. Z. Advances in pulsed power mineral processing technologies // Minerals. 2022, vol. 12, no. 9, p. 1177. DOI: 10.3390/min12091177.

19. *Karami E., Kuhar L., Bona A., Nikoloski A. N.* A review of electrokinetic, ultrasonic and solution pulsing methods for mass transfer enhancement in in-situ processing // *Minerals Engineering*. 2021, vol. 170, article 107029. DOI: 10.1016/j.mineng.2021.107029.

20. *Еремينا О. В., Бричкин В. Н.* Термическая активация слоистых силикатов с применением микроволнового излучения / *Нанопизика и Наноматериалы. Сборник научных трудов Международного семинара*. – 2020. – С. 133–139.

21. *Gholami H., Rezai B., Mehdilo A., Hassanzadeh A., Yarahmadi M.* Effect of microwave system location on floatability of chalcopyrite and pyrite in a copper ore processing circuit // *Physicochemical Problems of Mineral Processing*. 2020, vol. 56, no. 3, pp. 432–448. DOI: 10.37190/PPMP/118799.

22. *Li H., Long H., Zhang L., Yin S., Li S., Zhu F., Xie H.* Effectiveness of microwave-assisted thermal treatment in the extraction of gold in cyanide tailings // *Journal of Hazardous Materials*. 2020, vol. 384, article 121456. DOI: 10.1016/j.jhazmat.2019.121456.

23. *Charikinya E., Bradshaw S. M.* An experimental study of the effect of microwave treatment on long term bioleaching of coarse, massive zinc sulphide ore particles // *Hydrometallurgy*. 2017, vol. 173, pp. 106–114. DOI: 10.1016/j.hydromet.2017.08.001.

24. *Мельников Н. В., Ржевский В. В., Протождяконов М. М.* Справочник (кадастр) физических свойств горных пород. – М.: Недра, 1975. – 279 с.

25. *Гуляшинов П. А., Палеев П. Л., Гуляшинов А. Н.* Изучение процесса термического разложения скородита и пирита // *Международный журнал прикладных и фундаментальных исследований*. – 2017. – № 12-1. – С. 22–27.

26. *On H., Kim H., Myung E., Lim D., Park C.* Thermal decomposition of arsenopyrite by microwave heating and the effect of removal arsenic with wet-magnetic separation // *Journal of the Mineralogical Society of Korea*. 2017, vol. 30, no. 3, pp. 103–112. DOI: 10.9727/jmsk.2017.30.3.103.

27. *Hayashi M., Takeda K., Kashimura K., Watanabe T., Nagata K.* Carbothermic reduction of hematite powders by microwave heating // *ISIJ International*. 2013, vol. 53, no. 7, pp. 1125–1130. DOI: 10.2355/isijinternational.53.1125.

28. *Гзогян С. Р., Чантурия Е. Л.* Влияние термических воздействий на сульфиды и оксиды железа // *Горный информационно-аналитический бюллетень*. – 2010. – № 5. – С. 63–69.

29. *Kingman S. W., Rowson N. A.* Microwave treatment of minerals—a review // *Minerals Engineering*. 1998, vol. 11, no. 11, pp. 1081–1087. DOI: 10.1016/S0892-6875(98)00094-6.

30. *Кабанов А. А.* Влияние воды на термическую устойчивость  $\text{CaCO}_3$  // *Журнал физической химии*. – 2001. – Т. 75. – № 4. – С. 746–748.

31. *Головенько Ж. В., Гафнер С. Л., Гафнер Ю. Я.* Компьютерный анализ структурных свойств нанокластеров золота // *Фундаментальные проблемы современного материаловедения*. – 2010. – Т. 7. – № 2. – С. 11–16.

32. *Головенько Ж. В., Гафнер С. Л., Гафнер Ю. Я.* Исследование структурных состояний нанокластеров золота методом молекулярной динамики // *Фундаментальные проблемы радиоэлектронного приборостроения*. – 2008. – Т. 8. – № 2. – С. 83–86.


33. *Aleksandrova T. N., Nikolaeva N. V., Afanasova A. V., Romashev A. O., Aburova V. A., Prokhorova E. O.* Extraction of low-dimensional structures of noble and rare metals from carbonaceous ores using low-temperature and energy impacts at succeeding stages of raw material transformation // *Minerals*. 2023, vol. 13, no. 1. DOI: 10.3390/min13010084.

34. *Aleksandrova T. N., Afanasova A. V., Aleksandrov A. V.* Microwave treatment to reduce refractoriness of carbonic concentrates // *Journal of Mining Science*. 2020, vol. 56, no. 1, pp. 136–141. DOI: 10.1134/S1062739120016576.

35. *Lambert Jr. J. M., Simkovich G., Walker Jr. P. L.* Kinetics and mechanism of the pyrite-toppyrhotite transformation // *Metallurgical and Materials Transactions B: Process Metallurgy and Materials Processing Science*. 1998, vol. 29, no. 2, pp. 385–396. DOI: 10.1007/s11663-998-0115-x.



36. Шаповалов Н. А., Бушуева Н. П., Панова О. А. Устойчивость пирита при обжиге карбонатно-кремнеземистой смеси // Вестник Белгородского государственного технологического университета им. В.Г. Шухова. – 2015. – № 2. – С. 162–164.

37. Александрова Т. Н., Афанасова А. В., Абурова В. А. Патент РФ № 2799219С1, 04.07.2023. Способ извлечения низкоразмерных структур благородных металлов из углеродистого сырья, бюл. № 19. 

## REFERENCES

1. Litvinenko V. S., Sergeev I. B. Innovations as a factor in the development of the natural resources sector. *Studies on Russian Economic Development*. 2019, vol. 30, no. 6, pp. 637–645. DOI: 10.1134/S107570071906011X.

2. Petrov G. V., Fokina S. B., Boduen A. Y., Zotova I. E., Fidarov B. F. Arsenic behavior in the autoclave-hydrometallurgical processing of refractory sulfide gold-platinum-bearing products. *International Journal of Engineering and Technology (UAE)*. 2018, vol. 7, no. 2, pp. 35–39. DOI: 10.14419/ijet.v7i2.2.9897.

3. Fedotov P. K., Senchenko A. E., Fedotov K. V., Burdonov A. E. Studies of enrichment of sulfide and oxidized ores of gold deposits of the Aldan shield. *Journal of Mining Institute*. 2020, vol. 242, pp. 218–227. [In Russ]. DOI: 10.31897/PMI.2020.2.218.

4. Aleksandrova T. N., O'Connor C. Processing of platinum group metal ores in Russia and South Africa: current state and prospects. *Journal of Mining Institute*. 2020, vol. 244, pp. 462–473. [In Russ]. DOI: 10.31897/pmi.2020.4.9.

5. Efimov D. A., Gospodarikov A. P. Technical and technological aspects of the use of Reuleaux triangular profile rolls in crushing units in the ore processing plant. *MIAB. Mining Inf. Anal. Bull.* 2022, no. 10-2, pp. 117–126. [In Russ]. DOI: 10.25018/0236\_1493\_2022\_102\_0\_117.

6. Aleksandrova T., Nikolaeva N., Lieberwirth H., Aleksandrov A. Selective desintegration and concentration: Theory and practice. *E3S Web of Conferences*. 2018, vol. 56, article 03001. DOI: 10.1051/e3sconf/20185603029.

7. Romashev A. O., Nikolaeva N. V., Gatiatullin B. L. Adaptive approach formation using machine vision technology to determine the parameters of enrichment products deposition. *Journal of Mining Institute*. 2022, vol. 256, pp. 677–685. [In Russ]. DOI: 10.31897/PMI.2022.77.

8. Islamov S., Grigoriev A., Beloglazov I., Savchenkov S., Gudmestad O. T. Research risk factors in monitoring well drilling – A case study using machine learning methods. *Symmetry*. 2021, vol. 13, no. 7, article 1293. DOI: 10.3390/sym13071293.

9. Yakovleva T. A., Romashev A. O., Mashevsky G. N. Digital technologies for optimizing the dosing of flotation reagents during flotation of non-ferrous metal ores. *MIAB. Mining Inf. Anal. Bull.* 2022, no. 6-2, pp. 175–188. [In Russ]. DOI: 10.25018/0236\_1493\_2022\_62\_0\_175.

10. Yushina T. I., Malyshev O. A., Shchelkunov S. A. Flotation of gold-bearing ores of non-ferrous metals using acetylene-based reagents. *Tsvetnye Metally*. 2017, no. 2, pp. 13–19. [In Russ]. DOI: 10.17580/tsm.2017.02.01.

11. Owusu C., Agorhom E. A., Fosu S., Budu-Arthur E. Adsorption studies of sulphidic refractory gold ore. *Powder Technology*. 2020, vol. 375, pp. 310–316. DOI: 10.1016/j.powtec.2020.07.063.

12. Aleksandrova T. N., Kuznetsov V. V. A new approach to determining aeration intensity in flotation. *Journal of Mining Science*. 2022, vol. 58, no. 5, pp. 812–822.

13. Zhou C., Zhao Y., Liu C., Li Y., Gao Z., Fan X., Aleksandrova T., Duan C. Fluidization expansion of novel generation dense medium and flow regime transition in gas-solid separation fluidized bed. *Fundamental Research*. 2023. DOI: 10.1016/j.fmre.2023.02.008.

14. Aфанасова А. В., Абурова В. А., Прокхорова Е. О., Лущина Е. А. Investigation of the influence of depressors on flotation-active rock-forming minerals in sulphide goldbearing ore flotation. *MIAB. Mining Inf. Anal. Bull.* 2022, no. 6-2, pp. 161–174. [In Russ]. DOI: 10.25018/0236\_1493\_2022\_62\_0\_161.

15. Ivanik S. A., Ilyukhin D. A. Flotation extraction of elemental sulfur from gold-bearing cakes. *Journal of Mining Institute*. 2020, vol. 242, pp. 202–208. [In Russ]. DOI: 10.31897/PMI.2020.2.202.

16. Aleksandrova T. N., Kuznetsov V. V., Ivanov E. A. Investigation of the water hardness ions impact on the copper-nickel ores flotation probability. *MIAB. Mining Inf. Anal. Bull.* 2022, no. 6-1, pp. 263–278. [In Russ]. DOI: 10.25018/0236\_1493\_2022\_61\_0\_263.

17. Zakharov B. A., Meretukov M. A. *Zoloto: upornye rudy* [Gold: refractory ores], Moscow, ID «Ruda i Metally», 2013, 452 p.

18. Chanturiya V. A., Bunin I. Z. Advances in pulsed power mineral processing technologies. *Minerals*. 2022, vol. 12, no. 9, p. 1177. DOI: 10.3390/min12091177.

19. Karami E., Kuhar L., Bona A., Nikoloski A. N. A review of electrokinetic, ultrasonic and solution pulsing methods for mass transfer enhancement in in-situ processing. *Minerals Engineering*. 2021, vol. 170, article 107029. DOI: 10.1016/j.mineng.2021.107029.

20. Eremina O. V., Brichkin V. N. Microwave activation of phyllosilicates. *Nanofizika i Nanomaterialy. Sbornik nauchnykh trudov Mezhdunarodnogo seminara* [Nanophysics and Nanomaterials. Collection of scientific papers of the International Seminar], 2020, pp. 133–139.

21. Gholami H., Rezai B., Mehdilo A., Hassanzadeh A., Yarahmadi M. Effect of microwave system location on floatability of chalcopyrite and pyrite in a copper ore processing circuit. *Physicochemical Problems of Mineral Processing*. 2020, vol. 56, no. 3, pp. 432–448. DOI: 10.37190/PPMP/118799.

22. Li H., Long H., Zhang L., Yin S., Li S., Zhu F., Xie H. Effectiveness of microwave-assisted thermal treatment in the extraction of gold in cyanide tailings. *Journal of Hazardous Materials*. 2020, vol. 384, article 121456. DOI: 10.1016/j.jhazmat.2019.121456.

23. Charikinya E., Bradshaw S. M. An experimental study of the effect of microwave treatment on long term bioleaching of coarse, massive zinc sulphide ore particles. *Hydrometallurgy*. 2017, vol. 173, pp. 106–114. DOI: 10.1016/j.hydromet.2017.08.001.

24. Mel'nikov N. V., Rzhhevskiy V. V., Protod'yakonov M. M. *Spravochnik (kadastr) fizicheskikh svoystv gornykh porod* [Handbook (cadastre) of physical properties of rocks], Moscow, Nedra, 1975, 279 p.

25. Gulyashinov P. A., Paleev P. L., Gulyashinov A. N. The research of the process of thermal decomposition of pyrite and scorodite. *International Journal of Applied and Fundamental Research*. 2017, no. 12-1, pp. 22–27. [In Russ].

26. On H., Kim H., Myung E., Lim D., Park C. Thermal decomposition of arsenopyrite by microwave heating and the effect of removal arsenic with wet-magnetic separation. *Journal of the Mineralogical Society of Korea*. 2017, vol. 30, no. 3, pp. 103–112. DOI: 10.9727/jmsk.2017.30.3.103.

27. Hayashi M., Takeda K., Kashimura K., Watanabe T., Nagata K. Carbothermic reduction of hematite powders by microwave heating. *ISIJ International*. 2013, vol. 53, no. 7, pp. 1125–1130. DOI: 10.2355/isijinternational.53.1125.

28. Gzogyan S. R., Chanturiya E. L. The current state of the theory and practice of obtaining high-quality magnetite concentrates. *MIAB. Mining Inf. Anal. Bull.* 2010, no. 5, pp. 63–69.

29. Kingman S. W., Rowson N. A. Microwave treatment of minerals—a review. *Minerals Engineering*. 1998, vol. 11, no. 11, pp. 1081–1087. DOI: 10.1016/S0892-6875(98)00094-6.

30. Kabanov A. A. Effect of water on the thermal stability of CaCO<sub>3</sub>. *Zhurnal fizicheskoy khimii*. 2001, vol. 75, no. 4, pp. 746–748. [In Russ].

31. Golovenko J. V., Gafner S. L., Gafner I. Ya. Computer analysis of structural properties of gold nanoclusters. *Fundamental'nye problemy sovremennogo materialovedeniya*. 2010, vol. 7, no. 2, pp. 11–16. [In Russ].

32. Golovenko J. V., Gafner S. L., Gafner I. Ya. A study of the structural states of gold nanoclusters by molecular dynamics. *Fundamental'nye problemy sovremennogo materialovedeniya*. 2008, vol. 8, no. 2, pp. 83–86. [In Russ].

33. Aleksandrova T. N., Nikolaeva N. V., Afanasova A. V., Romashev A. O., Aburova V. A., Prokhorova E. O. Extraction of low-dimensional structures of noble and rare metals from carbonaceous ores using low-temperature and energy impacts at succeeding stages of raw material transformation. *Minerals*. 2023, vol. 13, no. 1. DOI: 10.3390/min13010084.

34. Aleksandrova T. N., Afanasova A. V., Aleksandrov A. V. Microwave treatment to reduce refractoriness of carbonic concentrates. *Journal of Mining Science*. 2020, vol. 56, no. 1, pp. 136 – 141. DOI: 10.1134/S1062739120016576.

35. Lambert Jr. J. M., Simkovich G., Walker Jr. P. L. Kinetics and mechanism of the pyrite-to-pyrrhotite transformation. *Metallurgical and Materials Transactions B: Process Metallurgy and Materials Processing Science*. 1998, vol. 29, no. 2, pp. 385 – 396. DOI: 10.1007/s11663-998-0115-x.

36. Shapovalov N. A., Bushueva N. P., Panova O. A. Stability of pyrite during firing of carbonate-silica mixture. *Vestnik Belgorodskogo gosudarstvennogo tekhnologicheskogo universiteta im. V.G. Shukhova*. 2015, no. 2, pp. 162 – 164. [In Russ].

37. Aleksandrova T. N., Afanasova A. V., Aburova V. A. *Patent RU 2799219C1*, 04.07.2023. [In Russ].

### ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ

Афанасова Анастасия Валерьевна<sup>1</sup> — канд. техн. наук,  
доцент, e-mail: Afanasova\_av@pers.spmi.ru,  
ORCID ID: 0000-0002-8451-2489,

Абурова Валерия Александровна<sup>1</sup> — аспирант,  
e-mail: lera.aburova@mail.ru,  
ORCID ID: 0000-0002-1364-5006,

<sup>1</sup> Санкт-Петербургский горный университет  
императрицы Екатерины II.

**Для контактов:** Афанасова А.В., e-mail: Afanasova\_av@pers.spmi.ru.

### INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

A.V. Afanasova<sup>1</sup>, Cand. Sci. (Eng.),  
Assistant Professor,  
e-mail: Afanasova\_av@pers.spmi.ru,  
ORCID ID: 0000-0002-8451-2489,

V.A. Aburova<sup>1</sup>, Graduate Student,  
e-mail: lera.aburova@mail.ru,  
ORCID ID: 0000-0002-1364-5006,

<sup>1</sup> Empress Catherine II Saint-Petersburg Mining University,  
199106, Saint-Petersburg, Russia.

**Corresponding author:** A.V. Afanasova, e-mail: Afanasova\_av@pers.spmi.ru.

Получена редакцией 03.05.2023; получена после рецензии 18.08.2023; принята к печати 10.12.2023.  
Received by the editors 03.05.2023; received after the review 18.08.2023; accepted for printing 10.12.2023.

