

КОМПЛЕКСНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ВОЗДЕЙСТВИЯ НИТРАТОВ КАЛИЯ И НАТРИЯ НА АРСЕНОПИРИТ В ПРОМЕЖУТОЧНОМ ПРОДУКТЕ ОБОГАЩЕНИЯ

Е. М. Дорошенко¹, А. В. Рассказова¹, Е. Д. Ким¹, И. О. Паньшин¹

¹ ФГБОУ ВО «Тихоокеанский государственный университет»,
680042, Хабаровск, ул. Тихоокеанская, 136

Аннотация: Объектом исследования послужил промежуточный продукт обогащения руды с горно-обогатительного комбината «Солнечный», являющийся полиминеральным сырьём. Остро стоит проблема удаления арсенопирита и соединений мышьяка и получения чистого олова из данного промежуточного продукта обогащения. Ранее в программном комплексе Thermo-Calc было выполнено моделирование взаимодействия арсенопирита с нитратами калия и натрия, и выявлен оптимальный состав и соотношение этих нитратов для качественного протекания реакции воздействия на арсенопирит. Был предложен альтернативный метод снижения концентрации мышьяка в полиминеральном сырье. Проведены лабораторные исследования воздействия нитрата калия и натрия на арсенопирит в целях проверки результатов компьютерного моделирования: термогравиметрический (ТГ) и дифференциальный термоанализ (ДТА). Эксперимент по воздействию смеси нитратов калия и натрия подтвердил данные моделирования, но и выявил новые соединения, образовавшиеся в ходе эксперимента. Методом микрорентгеноспектрального анализа был определён элементный состав и в последствии проведён анализ минералогического состава исходного измельчённого промежуточного продукта обогащения и промежуточного продукта с добавлением нитратов калия и натрия, а также анализ этих составов после термической обработки при 700 °С.

Ключевые слова: арсенопирит, пирит, мышьяк, касситерит, минералы, растровая электронная микроскопия, нитраты калия, нитраты натрия.

Благодарности: Коллектив авторов выражает благодарность Ермакову Михаилу Александровичу за помощь в получении данных для исследования на растровом электронном микроскопе Hitachi SU-70, Дорошенко Кириллу Владимировичу в помощи при термодинамическом моделировании, а также АО «ОРК» за предоставление проб промежуточного продукта обогащения касситеритового концентрата.

Для цитирования: Дорошенко Е. М., Рассказова А. В., Ким Е. Д., Паньшин И. О. Комплексное исследование воздействия нитратов калия и натрия на арсенопирит в промежуточном продукте обогащения // Горный информационно-аналитический бюллетень. — 2023. — № 12-2. — С. 40–52. DOI: 10.25018/0236_1493_2023_122_0_40.

Comprehensive research of the effect of potassium and sodium nitrates on arsenopyrite in a intermediate product of enrichment

E. M. Doroshenko¹, A. V. Rasskazova¹, E. D. Kim¹, I. O. Panshin¹

¹ Higher School of Industrial Engineering, Pacific National University (PNU), Khabarovsk, Russian Federation. jenya1992g@mail.ru

Abstract: The object of the research was the intermediate product of ore enrichment from the mining and processing plant “Solnechny”, which is a polymineral raw material. The problem of removal of arsenopyrite and arsenic compounds and obtaining pure tin from this intermediate product of beneficiation is acute. Previously, the interaction of arsenopyrite with potassium and sodium nitrates was modeled in the program complex Thermo-Calc and the optimal composition and ratio of these nitrates for the qualitative course of the impact reaction on arsenopyrite were revealed. An alternative method of arsenic concentration reduction in polymineral raw materials was proposed. Laboratory studies of the effect of potassium nitrate and sodium nitrate on arsenopyrite were carried out in order to verify the results of computer modeling: thermogravimetric (TG) and differential thermal analysis (DTA). The experiment on influence of potassium and sodium nitrate mixture confirmed the data of thermodynamic modeling, but also revealed new compounds formed during the experiment. The elemental composition was determined by micro-X-ray spectral analysis method, and then the mineralogical composition of the original milled beneficiation intermediate product and the intermediate product with the addition of potassium and sodium nitrate was analyzed, and the compositions were analyzed after heat treatment at 700 °C.

Key words: arsenopyrite, pyrite, arsenic, cassiterite, minerals, scanning electron microscopy, potassium nitrate, sodium nitrate.

Acknowledgments: The authors would like to thank Ermakov Mikhail Alexandrovich for help in obtaining data for the study on Hitachi SU-70 scanning electron microscope, Doroshenko Kirill Vladimirovich for assistance in thermodynamic modeling, as well as JSC “ORK” for providing samples of intermediate product of cassiterite concentrate enrichment.

For citation: Doroshenko E. M., Rasskazova A. V., Kim E. D., Panshin I. O. Comprehensive research of the effect of potassium and sodium nitrates on arsenopyrite in a intermediate product of enrichment. *MIAB. Mining Inf. Anal. Bull.* 2023;(12-1):40–52. [In Russ]. DOI: 10.25018/0236_1493_2023_122_0_40.

Введение

Задача исследования заключалась в том, чтобы из исследуемого промежуточного продукта обогащения касситеритового концентрата не только извлечь основной ценный минерал — касситерита, но и удалить арсенопирит, а также его соединения для последующего получения чистого олова без примесей соединений серы, железа и мышьяка. Проблема заключается в схожих плотностях двух данных минералов и невозможности их пол-

ного разделения гравитационными или другими традиционными методами.

Арсенопирит — минерал, принадлежащий к классу сульфидов. Ассоциируется с прочими сульфидами, а также с кварцем, касситеритом и вольфрамитом [1]. Сам по себе минерал не опасен, но мышьяк, содержащийся в его составе, является тяжелым металлом, опасным для окружающей среды, и в результате разрушения минерала может высвободиться в виде его токсичных соединений [2]. Мышьяк

в рудах традиционно считается вредной примесью [3], но современная переоценка добывающей промышленности позволяет оценивать мышьяк, входящий в состав определённых минералов, как целевой элемент.

Известно множество способов разложения арсенопирита в иные соединения мышьяка с помощью:

- сульфидирующего обжига [4, 5];
- окислительного обжига, при котором происходит образование триоксида мышьяка (As_2O_3), он сам по себе является крайне токсичным и опасным для здоровья человека соединением (стоит учитывать не только токсичность самого триоксида мышьяка, но и тот факт, что данный оксид может вступать в реакцию с оксидами металлов, что зачастую приводит к образованию арсенатов) [4, 6];

- биовыщелачивания, при котором поверхность арсенопирита становится гидрофильной вследствие покрытия образцов биоплёнкой, несмотря на то что поверхность арсенопирита в обычных условиях является гидрофобной [7];

- биоокисления арсенопирита до скородита путём его осаждения в мезофильных условиях [8];

- применения реагентов — оксида кальция при термическом разложении арсенопирита [9], оксида марганца, используемого для окисления арсенопирита и контроля мышьяка в кислой среде, которое способствует растворению арсенопирита и иммобилизации мышьяка [10], а также покрытие байеритом γ - $(Al(OH)_3)$, подавляющим окисление арсенопирита, блокируя контакт с кислородом [11]. Более быстрым, с увеличением скорости примерно в 10 раз, оказался способ разложения механически активированного арсенопирита в сравнении с неактивированным образцом [12].

Литературный обзор позволяет сделать выводы об эффективности спосо-

бов, в которых применяются методы химического обогащения и выделения арсенопирита методом перевода его в другие соединения. Часто с этой целью используются соединения щелочноземельных металлов.

Касситерит же — основной минерал для получения олова — является также целевым металлом в производственном цикле, где была отобрана проба промежуточного продукта обогащения. В настоящее время рентабельным является извлечение олова не только из руд, низкосортных оловянных концентратов [13], продуктов перемешки оловянного концентрата [14], но даже из хвостов [15]. Известны способы эффективного извлечения олова с помощью сульфидирующего обжига с использованием безводного гипса, при котором извлечение Sn достигает до 91,27% [16], и использования окислительного обжига с последующим сульфидирующим обжигом, позволяющего извлечь до 97,5% Sn и концентрировать свинец, цинк и мышьяк в огарке. [17].

Учитывая постоянное усложнение минерального состава и текстурно-структурных характеристик перерабатываемых оловянных руд, решение проблемы обеспечения отрасли нужными реагентами необходимо решать на фундаментальной основе с использованием физико-химических методов и аналитической химии [18].

Извлечение касситерита и получение чистого олова, а также поиск новых реагентов для химического обогащения минералов с вредными примесями в целевой продукт, являются приоритетными задачами в добывающей промышленности.

Методы

В качестве сырья был выбран полиминеральный промежуточный продукт обогащения касситерит-сульфидной руды ГОКа «Солнечный».

При помощи компьютерного моделирования с использованием базы данных The Materials Project были установлены качественные возможности протекания реакций превращения арсенопирита при воздействии хроматов и нитратов щелочноземельных металлов (Mg, Na, K, Ca).

Измельчение исходного промежуточного продукта обогащения и с добавлением нитрата калия и натрия (3/2) производилось в ступке.

Термогравиметрический и дифференциальный термоанализ проводили с помощью синхронного термоанализатора NETZCH STA 409 PC Luxx (Германия).

Термическую обработку исходного промежуточного продукта обогащения и с добавлением смеси нитрата калия и натрия (3/2) проводили в печи сопротивления при 700 °С в течение 3 часов.

Для определения минералогического состава исходного промежуточного продукта обогащения до и после термообработки, возможного протекания механической активации вследствие измельчения, а также минералогического состава продукта обогащения со смесью нитратов до и после термообработки проводили микрорентгеноспектральный анализ на растровом электронном микроскопе Hitachi SU-70 (Япония).

Результаты и их обсуждение

Результаты исследований [19–21] показывают необходимость использования в качестве реагента для взаимодействия с арсенопиритом смеси нитратов. В процессе ранее проведённого моделирования с помощью программного комплекса Thermo-Calc установлено, что оптимальный результат достигнут при совместном взаимодействии арсенопирита с нитратами калия и натрия в соотношении 3/2: именно

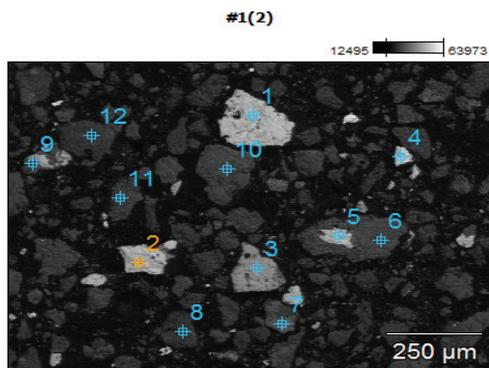
данный состав позволяет наиболее полно провести реакцию вследствие высокого сродства калия с мышьяком, а натрия — с серой [19].

Для определения необходимого для протекания реакции количества нитратов с помощью открытой базы данных The Materials Project был произведён расчет энтальпии реакций с минералами промпродукта и нитратами калия и натрия. С кварцем и кианитом взаимодействия не происходит, с фаялитом происходит крайне слабое взаимодействие (~ -55 кДж/моль), им можно пренебречь, а взаимодействие арсенопирита (~ -208 кДж/моль) и пирита (~ -225 кДж/моль) с нитратами происходит активно. Соответственно, при планировании экспериментов по химическому воздействию смеси нитратов необходимо учитывать реакцию способность не только арсенопирита, но и пирита, и добавлять нитраты соразмерно количеству этих минералов.

Для проведения экспериментов по воздействию смеси нитрата натрия и калия (2/3) с промпродуктом было произведено измельчение всех составляющих и исходного промежуточного продукта обогащения в ступке.

Для определения минералогического состава и проверки на наличие или отсутствие переходов минеральных составляющих в другие соединения за счёт воздействия давления при истирании был определен элементный состав исходного промпродукта методом рентгеноспектрального микроанализа. Данный метод не позволяет с высокой точностью установить количественное содержание лёгких элементов, таких, как кислород, азот, сера и т.д.

На рис. 1 точки 1, 2, 5 соответствуют по стехиометрии арсенопириту, точка 3 — пириту, 4 — касситериту, 8, 12 —



№ то-чек	O	Al	Si	S	Fe	As	Sn
1	2,71		0,73	10,49	38,24	47,83	
2				32,03	31,18	36,78	
3		0,83	1,98	65,51	31,68		
4	24,38	0,37			1,01		74,24
5			2,12	33,92	29,83	34,13	
6	48,25	17,63	20,46		13,66		
7	46,53	0,87	1,55		51,06		
8	63,32		36,68				
9	73,88	9,26	12,14		4,71		
10	70,50	11,53	12,90		5,07		
11	68,81	10,91	14,18		6,11		
12	29,36	0,48	68,79		1,37		

Рис. 1. Точки анализа элементов и их содержание в исходном измельчённом промпродукте
 Fig. 1. Analysis points of elements and their content in the initial milled intermediate product

кварцу, 6, 9–11 – кордиериту, а 7 – фаялиту. Сравнивая результаты ранее проведённого анализа [19] минералогического состава с результатами анализа измельчённого промпродукта, представленными на рис. 1, можно сделать вывод, что переход минеральных составляющих в другие соединения при истирании в ступке не происходит.

Далее был изготовлен образец, состоящий из промпродукта и смеси нитратов натрия и калия (2/3). При добавлении нитратов брали в расчёт количество минералов, содержащихся в промежуточном продукте обогащения, которые вступают в реакцию с нитра-

тами калия и натрия: пирит и арсенопирит. В исследуемом промежуточном продукте обогащения объемная доля пирита равна 3,97 %, а арсенопирита – 3,4 % от общей доли продукта обогащения. Следовательно, на 100 г готового состава необходимо взять 93,62 г промпродукта и 6,38 г смеси нитрата калия и натрия 3/2. Расчёт производился исходя из фазового состава и уравнений реакции, указанных в предыдущем исследовании [19]. Данный состав был также измельчён в ступке, и затем проведён анализ на растровом электронном микроскопе, результаты которого представлены на рис. 2.

На рис. 2 точки 1, 2 соответствуют стехиометрии касситерита, 4, 6, 7 — арсенопирита, 5, 11 — пирита, 9 — кварца, 8, 10 — кордиерита. В точках 5, 8, 10 среди других минералов наблюдается присутствие нитратов натрия и калия. Как видно, минералы и нитраты находятся в неизменном виде, а значит, не произошло взаимодействия нитратов с сульфидами при измельчении. В точке 3 был найден шеелит, в точке 12 — халькопирит. Стоит отметить, что данные минералы несут характер примесей и не являются для исследуемого промпродукта основными.

Затем был проведён ДТА и ТГ анализ исходного измельчённого промпродукта (рис. 3) и его смеси с нитратами калия и натрия. На диаграммах наблюдается экзотермический пик при ~ 535 °С у исходного промежуточного продукта обогащения и при ~ 590 °С у продукта обогащения с добавлением нитратов натрия и калия. При температуре выше данных пиков значимых реакций не происходит. Проведение ТГ и ДТА для полиминеральных промежуточных продуктов обогащения оказалось нецелесообразным вследствие большого количества наложений (пиков) от различных минералов.

Далее была проведена термообработка исследуемых порошков при температуре, выше температуры пиков на ДТА, равной 700 °С. А затем был проведён анализ порошков на растровом электронном микроскопе для получения более полного понимания процессов, протекающих при воздействии данной температуры на промежуточный продукт обогащения в целом и смеси нитратов с ним в частности.

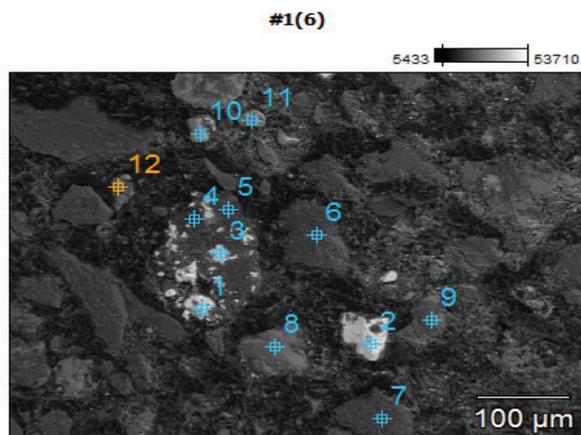
На рис. 4 точки 1–3 по стехиометрическому составу соответствуют касситериту. Мышьяк, содержащийся в точках 10 и 12, перешел из арсенопирита, вероятнее всего, в арсенат железа

или скородит, а также в данных точках присутствуют оксиды железа и кварц. В точках 4–6 и 9 содержатся кианит (производные от кордиерита) и кварц. Точка 7 соответствует стехиометрии кварца. В точке 8 находится инородное включение неясного происхождения. В точке 11 находятся кварц и оксиды железа.

На рис. 5 точки 1 и 2 по стехиометрии соответствуют касситериту. Мышьяк, содержащийся в точках 5, 9 и 10, находится в точке 5 и 10 в виде сульфида мышьяка (AsS) и арсената калия (AsK_3O_4), также в данных точках присутствуют оксиды железа, сульфат натрия (Na_2SO_4) и небольшое количество кордиерита и кварца — основных минералов в исследуемом промпродукте. В точке 9, вероятнее всего, мышьяк образует с железом мелкодисперсный сплав As_2Fe . В точке 3 содержатся кварц, кианит и следы нитрата натрия, а стехиометрия точек 4 и 6 соответствует кварцу. В точках 6–8 и 11 находятся фаялит и кианит, а в точке 12 кварц, оксиды железа и сульфат калия (K_2SO_4).

Анализ содержания элементов в точках для измельчённого исходного промпродукта после термообработки до 700 °С показал, что при данной температуре происходят пирометаллургические превращения и преобразование минералов в другие соединения. Неизменными остались лишь некоторые минералы, такие как касситерит и кварц, которые не подверглись воздействию пирометаллургических превращений.

Анализ содержания элементов в точках для измельчённого промпродукта с добавлением нитратов калия и натрия 3/2 после термообработки до 700 °С показал, что протекание реакции взаимодействия арсенопирита с нитратами происходит согласно данным термодинамического моделирования



	O	Al	Si	P	S	Ca	Fe	Cu	As	Sn
1	40,19									59,81
2	55,23	1,77	3,10		0,39		1,31			38,20
3	54,26	1,42	3,36		0,38		1,40			39,18
4	58,14	4,09	30,73		1,28	0,51	3,95			1,30
5	38,10	23,11	28,82		1,33	0,80	7,83			
6	42,82	12,92	44,26							
7	60,57	0,50	38,93							
8	44,88		0,27	21,54		33,31				
9	51,77	16,36	22,69			1,33	7,85			
10	53,29		0,64		1,56	0,56	29,44	7,16	7,35	
11	56,91	1,87	6,56		0,95	0,17	33,28		0,26	
12	40,55	3,36	6,80		1,14	0,73	34,35	1,02	12,06	

Рис. 4 Точки анализа элементов и их содержание исходного измельчённого промежуточного продукта обогащения после термообработки 700 °С, ат. %

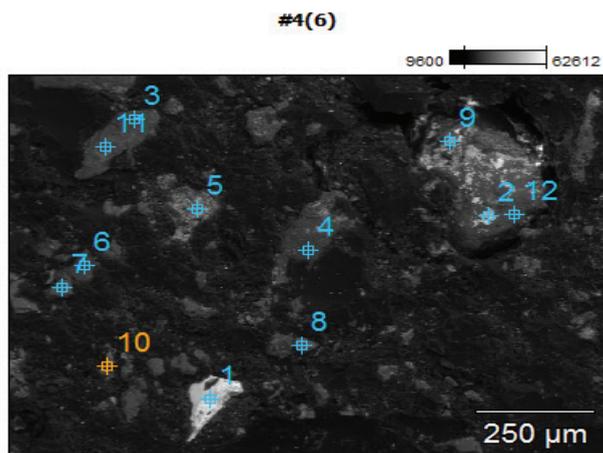
Fig. 4 Analysis points of elements and their contents of the original milled intermediate beneficiation product after heat treatment at 700 °C, at. %

по реакции $5\text{AsFeS} + 3\text{KNO}_3 + 2\text{NaNO}_3 \rightarrow \text{AsK}_3\text{O}_4 + 4\text{AsS} + \text{Fe}_2\text{O}_3 + \text{Fe}_3\text{O}_4 + \text{Na}_2\text{SO}_4 + 2,5\text{N}_2\uparrow$ с образованием всех соединений, представленных в данной формуле. Также получились интересные результаты и помимо вышеуказанных соединений мышьяка, мышьяк образует мелкодисперсный сплав As_2Fe , вероятно являющийся лёллингитом. При этом касситерит и кварц в реакции участия не принимали и остались в неизменном виде, что подтверждает данные, полученные при термодинамическом моделировании.

Заключение

При проведении комплексного исследования воздействия нитратов калия и натрия на арсенопирит в промежуточном продукте обогащения был сделан ряд выводов.

1) При измельчении исходного промежуточного продукта обогащения и промежуточного продукта с добавлением нитрата калия и натрия (3/2) минералы и нитраты находятся в неизменном виде, а значит, не произошло взаимодействия нитратов с сульфидами под воздействием давления при измельчении.



	O	Na	Al	Si	S	K	Fe	As	Sn
1	60,90		0,36				0,44		38,30
2	52,37	1,20	1,81		0,85		1,63	0,64	41,50
3	56,89	9,67	8,05	25,39					
4	50,88			49,12					
5	49,32	6,47	1,06		5,05	2,24	28,40	7,45	
6	61,89			37,87			0,24		
7	74,31		9,48	12,73			3,49		
8	74,93		8,76	12,06			4,25		
9	6,63	0,44	0,68	1,50	0,91	0,97	32,85	56,02	
10	46,58	2,00	5,62	29,80	1,77	1,74	5,33	7,16	
11	49,05	5,77	10,04	28,70		2,81	3,63		
12	84,79			8,42	2,39	1,05	3,35		

Рис. 5 Точки анализа и их содержание измельчённого промежуточного продукта обогащения с нитратами калия и натрия (3/2) после термообработки 700 °С

Fig. 5 Analysis points and their contents of milled intermediate beneficiation product with potassium and sodium nitrate (3/2) after 700°C heat treatment

2) При проведении анализа содержания элементов для измельчённого исходного промпродукта после термообработки до 700 °С выяснилось, что при данной температуре происходят пирометаллургические превращения и преобразование минералов в другие соединения. Неизменными остались лишь касситерит и кварц.

3) При исследовании измельчённого промпродукта с добавлением нитратов калия и натрия (3/2) после термообработки до 700 °С методом растровой электронной микроскопии выяснилось,

что протекание реакции взаимодействия арсенопирита с нитратами происходит по данным термодинамического моделирования по формуле $5\text{AsFeS} + 3\text{KNO}_3 + 2\text{NaNO}_3 \rightarrow \text{AsK}_3\text{O}_4 + 4\text{AsS} + \text{Fe}_2\text{O}_3 + \text{Fe}_3\text{O}_4 + \text{Na}_2\text{SO}_4 + 2,5\text{N}_2 \uparrow$ с образованием всех соединений, представленных в реакции. Также, исходя из полученных результатов, помимо вышеуказанных соединений, мышьяк образует мелкодисперсный сплав As_2Fe , вероятно являющийся лёллингитом. При этом касситерит и кварц в реакции участия не принимали и остались в неизменном виде.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Юсупов Т. С., Кондратьев С. А., Бакшеева И. И. Структурно-химические и технологические свойства техногенного касситерит-сульфидного минералообразования // Обогащение руд. — 2016. — №5. DOI 10.17580/op.2016.05.05.

2. *Martin Okrusch, Hartwing E.* Frimmel Mineralogy: An Introduction to Minerals, Rocks, and Mineral Deposits Berlin, Germany: Springer Textbooks in Earth Sciences, Geography and Environment, 2020. 719 p.

3. *Игнатов Д. О., Каюмов А. А., Игнаткина В. А.* Селективное разделение мышьяк-содержащих сульфидных минералов // Цветные металлы. — 2018. — №7 DOI10.17580/tsm.2018.07.05.

4. *Гурман М. А.* Использование термохимических методов при переработке золото-содержащих пирит-арсенопиритовых концентратов // Горный информационно-аналитический бюллетень. — 2013. — № 4. — с. 180–186.

5. *Молдурущу М. О.* Разработка технологии извлечения мышьяка из отходов аммиачно-автоклавного передела кобальтсодержащих руд: Автореферат диссертации на соискание ученой степени кандидата технических наук. — Кызыл: Российская академия наук (РАН), Сибирское отделение (СО), Тувинский институт комплексного освоения природных ресурсов (ТувИКОПР), 2018. — 22 с.

6. *Ri-jin Cheng, Hong-wei Ni, Hua Zhang, Xiao-kun Zhang, and Si-cheng Bai.* Mechanism research on arsenic removal from arsenopyrite ore during a sintering process // Int. J. Miner. Metall. Mater., Vol. 24, No. 4, Apr. 2017 — p. 353–359

7. *Yin L, Yang H, Tong L, Ma P, Zhang Q and Zhao M.* Arsenopyrite Bio-Oxidization Behavior in Bioleaching Process: Evidence From Laser Microscopy, SEM-EDS, and XPS. Front. Microbiol. — 2020. — Vol. 11. Article 1773. — p. 12, <https://doi.org/10.3389/fmicb.2020.01773>.

8. *Barahona S., Herrera E., Jara A., Castro-Severyn J., Gallardo K., Fuentes G., Dorador C., Saavedra C., Remonsellez F.* Arsenopyrite Dissolution and Bioscorodite Precipitation by *Acidithiobacillus ferrivorans* ACH under Mesophilic Condition. // Minerals. — 2022, 12 p. <https://doi.org/10.3390/min12050520>.

9. *Mikhail S. A., Turcotte A. M.* Thermal decomposition of arsenopyrite in the presence of calcium oxide // Thermochimica Acta. — 1992. — Vol. 212. p. 27–37, [https://doi.org/10.1016/0040-6031\(92\)80217-K](https://doi.org/10.1016/0040-6031(92)80217-K).

10. *Pan X., Liu L.-Z., Nie Z.-Y., Xia J.-L.* MnO₂ Drives the Green Decomposition of Arsenopyrite by Mediating the Fate of Arsenic to Generate FeAsO₄ // Minerals. — 2023. — №13. 17 p. <https://doi.org/10.3390/min13050657>.

11. *Ilhwan Park, Carlito Tabelin, Hiroyuki Inano, Kensuke Seno, Kazuki Higuchi, Mayumi Ito and Naoki Hiroyoshi* Formation of surface protective coatings on arsenopyrite using Al-catecholate complex and its mode of inhibition of arsenopyrite oxidation // MATEC Web of Conferences– 2019 –5 p. <https://doi.org/10.1051/mateccconf/201926806015>.

12. *Baláz P., Balassaová M.* Thermal decomposition of mechanically activated arsenopyrite. // Journal of Thermal Analysis. — 1994. — №41, p. 1101–1107. DOI: 10.1007/BF02547199.

13. *Jing-cheng Wang, Lei Li, and Yong Yu.* Tin recovery from a low-grade tin middling with high Si content and low Fe content by reduction-sulfurization roasting with anthracite coal // Int. J. Miner. Metall. Mater. — Vol. 28, No. 2. — Feb. 2021. — pp. 210–220, DOI: [10.1007/s12613-020-2038-8](https://doi.org/10.1007/s12613-020-2038-8)

14. *Газалеева Г. И., Назаренко Л. Н., Дмитриева Е. Г.* Исследование влияния дзета-потенциала поверхности минералов на процесс флотации касситерита // Известия вузов. Горный журнал. — 2020. — № 3, — с. 70–79, DOI: 10.21440/0536-1028-2020-3-70-79.

15. *Limin Zhang, Sultan an Khoso, Mengjie Tian, Wei Sun* Cassiterite recovery from a sulfide ore flotation tailing by combined gravity and flotation separations // Physicochem. Probl. Miner. Process. — 2021. –№ 57(1), — p. 206–215, DOI: 10.37190.

16. *Yufeng Guo, Jianfa Jing, Feng Chen, Shuai Wang, Lingzhi Yang* Selective separation of tin from tin-bearing middling via sulfur roasting // *Environmental Technology & Innovation*. – 2022. – №27 – 9 p.

17. *Yong Yu, Lei Li, Jingcheng Wang* Sn recovery from a tin-bearing middling with a high iron content and the transformation behaviours of the associated As, Pb, and Zn // *Science of the Total Environment*. – 2020 –14 p.

18. *Комогорцев Б. В., Вареничев А. А.* Применение селективных реагентов-собира-телей в технологиях флотационного обогащения золотосодержащих сульфидных руд // *Горный информационно-аналитический бюллетень*. – 2016. – № 12. – с. 231–242.

19. *Дорошенко Е. М., Ким Е. Д., Рассказова А. В., Ри Э. Х.* Исследование фазового состава промежуточного продукта обогащения с последующим моделированием состава солей калия и натрия для разложения арсенопирита // *Вопросы материаловедения*. – 2023. – № 2 (114), с. 113–124. DOI: 10.22349/1994–6716–2023–114–2–113–124.

20. *Doroshenko E. M., Doroshenko K. V., Ostapenko A. B., Rasskazova A. V.* Computer modeling of various salts interaction with arsenopyrite // *Вода: химия и экология*. – 2023. – № 5. p. 48–54.

21. *Дорошенко Е. М., Ниёззода Т. Д., Новиков А. А., Ри Хо Сен.* Термодинамическое моделирование взаимодействия арсенопирита и касситерита с солями калия и натрия // *Физика: фундаментальные и прикладные исследования, образование (Материалы XX региональной научной конференции)* – Хабаровск, 2022. – с. 103–106. 

REFERENCES

1. Yusupov T. S., Kondrat'ev S. A., Baksheeva I. I. Production-induced cassiterite-sulfide mineral formation structural-chemical and technological properties. *Obogashchenie rud*. 2016. no.5 DOI 10.17580/or.2016.05.05.

2. Martin Okrusch, Hartwing E. Frimmel *Mineralogy: An Introduction to Minerals, Rocks, and Mineral Deposits* Berlin, Germany: Springer Textbooks in Earth Sciences, Geography and Environment, 2020. 719 p.

3. Ignatov D. O., Kayumov A. A., Ignatkina V. A. Selective separation of arsenic-containing sulfide minerals. *Tsvetnye metally/ 2018/ no.7* DOI10.17580/tsm.2018.07.05.

4. Gurman, M. A. Thermochemical techniques in gold-bearing pyrite–arsenopyrite concentrate processing. *MIAB. Mining Inf. Anal. Bull.* 2013. no. 4. p. 180–186.

5. Moldurushku M. O. Development of technology of manufacturing mice from wastes of ammonia-autoclave processing of cobalt ores : Abstract of thesis for the degree of Candidate of Technical Sciences. Kyzyl: Russian Academy of Sciences (RAS), Siberian Branch (SB), Tuva Institute for the Integrated Development of Natural Resources, 2018. 22 p.

6. Ri-jin Cheng, Hong-wei Ni, Hua Zhang, Xiao-kun Zhang, and Si-cheng Bai. Mechanism research on arsenic removal from arsenopyrite ore during a sintering process. *Int. J. Miner. Metall. Mater.*, Vol. 24, No. 4, Apr. 2017 p. 353–359.

7. Yin L, Yang H, Tong L, Ma P, Zhang Q and Zhao M. Arsenopyrite Bio-Oxidization Behavior in Bioleaching Process: Evidence From Laser Microscopy, SEM-EDS, and XPS. *Front. Microbiol.* 2020. Vol. 11. Article 1773. p. 12, <https://doi.org/10.3389/fmicb.2020.01773>.

8. Barahona S., Herrera E., Jara A., Castro-Severyn J., Gallardo K., Fuentes G., Dorador C., Saavedra C., Remonsellez F. Arsenopyrite Dissolution and Bioscorodite Precipitation by *Acidithiobacillus ferrivorans* ACH under Mesophilic Condition.. *Minerals*. 2022, 12 p. <https://doi.org/10.3390/min12050520>.

9. Mikhail S. A., Turcotte A. M. Thermal decomposition of arsenopyrite in the presence of calcium oxide. *Thermochimica Acta*. 1992. Vol. 212. p. 27–37, [https://doi.org/10.1016/0040-6031\(92\)80217-K](https://doi.org/10.1016/0040-6031(92)80217-K).

10. Pan, X.; Liu, L.-Z.; Nie, Z.-Y.; Xia, J.-L. MnO₂ Drives the Green Decomposition of Arsenopyrite by Mediating the Fate of Arsenic to Generate FeAsO₄. *Minerals*. 2023. no.13. 17 p. <https://doi.org/10.3390/min13050657>.
11. Ilhwan Park, Carlito Tabelin, Hiroyuki Inano, Kensuke Seno, Kazuki Higuchi, Mayumi Ito and Naoki Hiroyoshi Formation of surface protective coatings on arsenopyrite using Al-catecholate complex and its mode of inhibition of arsenopyrite oxidation. *MATEC Web of Conferences*– 2019 –5 p. <https://doi.org/10.1051/mateconf/201926806015>.
12. Baláz P., Balassaová M. Thermal decomposition of mechanically activated arsenopyrite.. *Journal of Thermal Analysis*. 1994. no.41, p. 1101–1107. DOI: 10.1007/BF02547199.
13. Jing-cheng Wang, Lei Li, and Yong Yu. Tin recovery from a low-grade tin middling with high Si content and low Fe content by reduction–sulfurization roasting with anthracite coal. *Int. J. Miner. Metall. Mater.* Vol. 28, No. 2. Feb. 2021 pp. 210–220, DOI: /10.1007/s12613-020-2038-8.
14. Gazaleeva G. I., Nazarenko L. N., Dmitrieva E. G. The research of the absorption potential effect of the minerals surface on the cassiterite flotation process. *News of the Higher Institutions. Mining Journal*. 2020. no. 3, p. 70–79, DOI: 10.21440/0536-1028-2020-3-70-79.
15. Limin Zhang, Sultan an Khoso, Mengjie Tian, Wei Sun Cassiterite recovery from a sulfide ore flotation tailing by combined gravity and flotation separations. *Physicochem. Probl. Miner. Process.* 2021. –no. 57(1), p. 206–215, DOI: 10.37190.
16. Yufeng Guo, Jianfa Jing, Feng Chen, Shuai Wang, Lingzhi Yang Selective separation of tin from tin-bearing middling via sulfur roasting. *Environmental Technology & Innovation*. 2022/ no.27 9 p.
17. Yong Yu, Lei Li, Jingcheng Wang Sn recovery from a tin-bearing middling with a high iron content and the transformation behaviours of the associated As, Pb, and Zn. *Science of the Total Environment*. 2020 –14 p.
18. Komogortsev B. V., Varenichev A. A. The use of selective collecting agents in technology flotation gold-sulfide ores. *MIAB. Mining Inf. Anal. Bull.* 2016. no. 12. p. 231–242.
19. Doroshenko E. M., Kim E. D., Rasskazova A. V., Ri E. Kh. Investigation of the phase composition of the middlings with subsequent simulation of the compositions of potassium and sodium salts for the decomposition of arsenopyrite. *Voprosy materialovedeniya*. 2023. no. 2 (114), p. 113–124. DOI: 10.22349/1994-6716-2023-114-2-113-124.
20. Doroshenko E. M., Doroshenko K. V., Ostapenko A. B., Rasskazova A. V. Computer modeling of various salts interaction with arsenopyrite. *Water: chemistry and ecology*. 2023. no. 5. p. 48–54.
21. Doroshenko E. M., Niezzoda T. D., Novikov A. A., Ri Kho Sen. Thermodynamic modelling of the interaction of arsenopyrite and cassiterite with potassium and sodium salts. *Physics: Fundamental and Application Research, Education (Papers of the XX Regional Scientific Conference) Khabarovsk*, 2022. p. 103–106.

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ

Дорошенко Екатерина Михайловна – orcid: 0009-0008-5626-9830, аспирант Высшей школы промышленной инженерии, Тихоокеанского государственного университета (ТОГУ), Российская Федерация, Хабаровск, dorekami@yandex.ru;
Рассказова Анна Вадимовна – orcid: 0000-0002-6998-8120, кандидат технических наук, доцент Высшей школы промышленной инженерии, Тихоокеанского государственного университета, Российская Федерация, Хабаровск, annbot87@mail.ru;

Ким Евгений Давидович – orcid: 0000–0002–0175–0503, кандидат технических наук, доцент Высшей школы промышленной инженерии, Тихоокеанского государственного университета, Российская Федерация, Хабаровск, jenua1992g@mail.ru;
Паньшин Иван Олегович – лаборант департамента инновационной политики и разработок Тихоокеанского Государственного Университета, Российская Федерация, Хабаровск, yojick2674@yandex.ru.

INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

Doroshenko E. M., orcid: 0009–0008–5626–9830, Postgraduate student of the Higher School of Industrial Engineering, Pacific National University (PNU), Khabarovsk, Russia, dorekami@yandex.ru;

2. *Rasskazova A. V.*, orcid: 0000–0002–6998–8120, Cand. Sci. (Eng.), Associate Professor of the Higher School of Industrial Engineering, Pacific National University (PNU), Khabarovsk, Russia, annbot87@mail.ru;

3. *Kim E. D.*, Cand. Sci. (Eng.), Associate Professor of the Higher School of Industrial Engineering, Pacific National University (PNU), Khabarovsk, Russia, jenua1992g@mail.ru;

4. *Pan'shin I. O.*, Laboratory assistant of the Department of Innovation Policy and Development of the Pacific National University, Khabarovsk, Russia, yojick2674@yandex.ru.

Получена редакцией 05.10.2023; получена после рецензии 23.10.2023; принята к печати 10.11.2023.

Received by the editors 05.10.2023; received after the review 23.10.2023; accepted for printing 10.11.2023.

