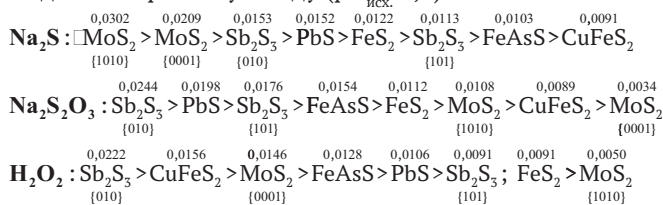


## ИССЛЕДОВАНИЕ КИНЕТИКИ ЭЛЕКТРОДНЫХ ПОТЕНЦИАЛОВ СУЛЬФИДНЫХ МИНЕРАЛЬНЫХ ЭЛЕКТРОДОВ В ПРИСУТСТВИИ МОДИФИКАТОРОВ ФЛОТАЦИИ

А.А. Каюмов<sup>1</sup>, В.А. Игнаткина<sup>1</sup>, Н.Д. Ергешева<sup>1</sup>

<sup>1</sup> НИТУ «МИСиС», Москва, Россия, e-mail: maliaby\_92@mail.ru

**Аннотация:** Представлены результаты потенциометрических исследований с применением минеральных электродов трудноокисляемых сульфидов – стибнита, молибденита, галенита – в сравнении с пиритом, арсенопиритом, халькопиритом в контролируемых окислительно-восстановительных условиях. Молибденит, стибнит и арсенопирит обладают наибольшей энергией кристаллической решетки в сравнении с пиритом и халькопиритом, что указывает на устойчивость минералов к окислительно-восстановительным процессам и согласуется с результатами измерений электродных потенциалов. Установлена анизотропия электродных потенциалов трудноокисляемых сульфидов по разным кристаллохимическим направлениям. В дистиллированной воде электродный потенциал стибнита {010} +177,76 мВ, молибденита {0001} +149,5 мВ; а стибнита {101} –898,27 мВ и молибденита {1010} –375,42 мВ. В диапазоне pH 2–12 электродный потенциал стибнита {010} и молибденита {0001} остается в положительной области вплоть до pH 10, затем переходит в отрицательную область при pH >11, а электродный потенциал стибнита {101} и молибденита {1010} остается в отрицательной области на всем исследуемом диапазоне pH. Отрицательный электродный потенциал галенита сдвигается в окислительную область при pH 2–7, затем сдвигается в восстановительную при pH 8–12. В отличие от трудноокисляемых сульфидов электродный потенциал пирита, арсенопирита и халькопирита сдвигается в отрицательную область при значении pH > 8. Определены 9 изменения электродных потенциалов минеральных электродов при введении модификаторов флотации в дистиллированную воду (pH<sub>исх.</sub> 5,5).



Скорость изменения электродных потенциалов сульфидов зависит от щелочности среды.

**Ключевые слова:** стибнит, молибденит, галенит, пирит, арсенопирит, халькопирит, спайность, структура, сернистый натрий, тиосульфат натрия, пероксид водорода, поверхностные свойства, окисление, восстановление, электродный потенциал.

**Благодарность:** Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда № 22-27-00102, <https://rscf.ru/project/22-27-00102/>.

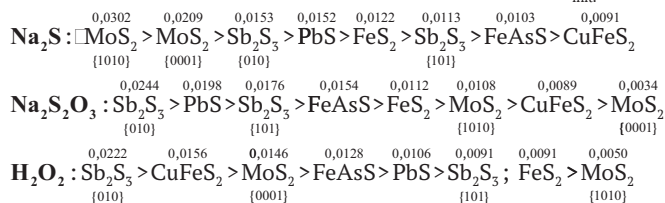
**Для цитирования:** Каюмов А. А., Игнаткина В. А., Ергешева Н. Д. Исследование кинетики электродных потенциалов сульфидных минеральных электродов в присутствии модификаторов флотации // Горный информационно-аналитический бюллетень. – 2023. – № 10. – С. 89–103. DOI: 10.25018/0236\_1493\_2023\_10\_0\_89.

# Kinetics of electrode potentials of sulfide mineral electrodes in the presence of flotation modifiers

A.A. Kayumov<sup>1</sup>, V.A. Ignatkina<sup>1</sup>, N.D. Ergesheva<sup>1</sup>

<sup>1</sup> National University of Science and Technology «MISiS», Moscow, Russia, e-mail: maliaby\_92@mail.ru

**Abstract:** The article describes the potentiometric studies carried out with mineral electrodes of non-oxidizable sulfides — stibnite, molybdenite and galena — in comparison with pyrite, arsenopyrite and chalcopyrite in the controllable oxidation–reduction environment. Molybdenite, stibnite and arsenopyrite possess the highest crystal lattice energy as against pyrite and chalcopyrite, which points at the redox resistance of the minerals and agrees with the resultant measurements of electrode potentials. Anisotropy of electrode potentials of non-oxidizable sulfides is determined in different areas of crystal chemistry. In distilled water, stibnite {010} and molybdenite {0001} have the electrode potentials of +177.76 mV and +149.5 mV, respectively, while stibnite {101} and molybdenite {1010} have the electrode potentials of -898.27 mV and -375.42 mV, respectively. In the pH range of 2–12, the electrode potentials of stibnite {010} and molybdenite {0001} remain positive up to pH 10 and become negative when pH >11, and the electrode potentials of stibnite {101} and molybdenite {1010} remain negative within the whole test range of pH. The negative electrode potential of galena shifts to the oxidation area at pH 2–7 and then displaces in the reduction area at pH 8–12. As against the non-oxidizable sulfides, the electrode potentials of pyrite, arsenopyrite and chalcopyrite shift to the negative area when pH > 8. The change  $\vartheta$  in the electrode potentials of the mineral electrodes is determined in case of addition of flotation modifiers in distilled water (pH<sub>init.</sub> 5.5).



The rate of change in the electrode potential of sulfides depends on the alkalinity of the environment.

**Key words:** stibnite, molybdenite, galena, pyrite, arsenopyrite, chalcopyrite, cleavage, structure, sodium sulfide, sodium thiosulfate, hydrogen peroxide, surface properties, oxidation, reduction, electrode potential.

**Acknowledgements:** The study was supported by the Russian Science Foundation, Grant No. 22-27-00102.

**For citation:** Kayumov A. A., Ignatkina V. A., Ergesheva N. D. Kinetics of electrode potentials of sulfide mineral electrodes in the presence of flotation modifiers. *MIAB. Mining Inf. Anal. Bull.* 2023;(10):89-103. [In Russ]. DOI: 10.25018/0236\_1493\_2023\_10\_0\_89.

## Введение

Комплексные физико-химические исследования мономинералов с флотационными реагентами на макро-, микро- и

наноуровнях являются информативным инструментом при разработке технологий селективной флотации цветных и благородных металлов труднообогати-

мых сульфидных руд [1]. В тонковкрапленных сульфидных рудах преобладают полиминеральные ассоциации с неравномерной и тонкодисперсной вкрапленностью целевых минералов и тесным взаимопрорастанием сульфидов цветных металлов, железа и породных минералов друг с другом.

Полиминеральные сростки характеризуются разнообразием структуры кристаллов, формы и примесного состава минералов, обладающих неоднородными физико-химическими и флотационными свойствами. Применение классических схем рудоподготовки в технологиях переработки тонковкрапленных сульфидных руд, без своевременного селективного раскрытия и выделения на флотацию готового по крупности материала, приводит к переизмельчению хрупких минералов и недораскрытию сростков минеральных комплексов. Высокоразвитая поверхность минеральных шламов с адсорбционной способностью многократно увеличивает расход флотационных реагентов и нарушает режим селективной флотации [2 – 5].

И.Н. Плаксин [6] ввел термин «флотационная минералогия», включающий исследование кристаллохимической структуры минералов, примесного состава и электрохимических свойств. Кристаллохимия минералов определяет взаимосвязь состояния поверхности, взаиморасположения ионов в кристаллической структуре и электродного потенциала с характером взаимодействия флотационных реагентов с минералами — флотированности [7, 8].

Сульфидные минералы обладают различными величинами электродного потенциала, которые зависят от типов связи ион-атомов в кристаллической решетке. Прочность связи ион-атомов в кристаллической решетке минералов характеризуется энергией кристаллической решетки [9]. Успех флотации в основном

зависит от свойств поверхности (окисленности, примесного состава) минералов и применяемых флотационных реагентов — собирателей, модификаторов, депрессоров и др., влияющих на изменение электродного потенциала минералов, ионно-молекулярного состава и окислительно-восстановительного потенциала (ОВП) жидкой фазы.

В [10] при использовании  $H_2O_2$  и  $Na_2S$  в качестве окислителя и восстановителя среды наибольшая флотированность халькопирита установлена в диапазоне электродных потенциалов от  $-100$  мВ до  $+200$  мВ. Извлечение халькопирита снижается при высоких концентрациях окислителя или восстановителя, когда электродный потенциал смещается в область  $-400$  мВ или  $+500$  мВ, что согласуется с нашими результатами [11]. При флотационном разделении коллективного медно-молибденового концентрата флотированность халькопирита снижается при электродном потенциале  $<+100$  мВ. Увеличение концентрации сернистого натрия с 47 мг/л до 94 мг/л не способствует повышению контрастности флотации молибденита от халькопирита и приводит к заметному снижению адсорбции собирателя на молибдените и его флотированности [12]. Организация контроля ОВП на медных комплексах Среднего востока предприятий Anaconda Copper Mining в цикле селекции коллективного медно-молибденового концентрата позволило на полупромышленных испытаниях определить эффективное ОВП =  $-200$  мВ, при котором извлечение молибдена составило более 85% при низкой флотированности халькопирита [13].

В [14, 15] приводится анализ физико-химических и флотационных свойств стибнита. Электродный потенциал стибнита сдвигается в положительную область после обработки солями тяжелых металлов. По степени увеличения активирующего действия поверхности стиб-

нита катионы располагаются в следующем ряду:  $Pb^{2+} > Cu^{2+} > Ag^{1+} > Zn^{2+}$ . Адсорбция катионов на поверхности сульфида объясняется их химическим сродством к сере, что сопровождается сдвигом электродного потенциала сульфида. В сравнении с ксантогенатами флотиремость стибнита выше с дитиофосфатами и дитиофосфинатами [16, 17].

В [18] приведены результаты флотации мономинералов стибнита и арсенопирита с использованием бутилового ксантогената при  $pH = 9$  с контролем ОВП. Флотиремость стибнита снижается при ОВП  $< 0$  мВ, в то время как арсенопирит флотируется в диапазоне ОВП от  $-200$  мВ до  $+200$  мВ. В условиях микрофлотации определены возможные условия разделения сульфидов при  $pH 9-10$  посредством регулирования ОВП от  $-120$  мВ до  $-150$  мВ с использованием восстановителя среды ( $Na_2S_2O_4$ ). Для повышения контрастности флотации стибнита от пирита предлагается использование карбоксиметилтретиокарбоната динатрия (КМТ). Ингибирующее воздействие КМТ на пирит снижает адсорб-

цию диэтилтиокарбамата натрия и, тем самым, флотиремость сульфида железа [19].

Цели работы: исследование величины электродного потенциала трудноокисляемых сульфидов – молибденита ( $MoS_2$ ), стибнита ( $Sb_2S_3$ ), галенита ( $PbS$ ) – в сравнении с халькопиритом ( $CuFeS_2$ ), арсенопиритом ( $FeAsS$ ) и пиритом ( $FeS_2$ ) в окислительно-восстановительных условиях эксперимента. Изучение влияния  $pH$ , модификаторов –  $H_2O_2$ ,  $Na_2S_2O_3$ ,  $Na_2S$  на кинетику значений электродного потенциала в зависимости от типа сульфида при разных условиях подготовки минерального электрода (по спайности или торцу).

#### Объекты и методы исследования

Минеральные электроды для измерения электродного потенциала изготовлены из штучных образцов сульфидов –  $MoS_2$ ,  $Sb_2S_3$ ,  $PbS$ ,  $FeS_2$ ,  $FeAsS$ ,  $CuFeS_2$  месторождений РФ.

Штуфы предварительно просматривались с помощью исследовательского стереомикроскопа высокого разрешения

Таблица 1

#### Элементный состав исследованных сульфидов Elemental Composition of the Studied Sulfides

Минерал	Массовая доля, %									
	$\frac{Mo}{Mo_{стех}}$	$\frac{Sb}{Sb_{стех}}$	$\frac{Pb}{Pb_{стех}}$	Zn	$\frac{Cu}{Cu_{стех}}$	$\frac{As}{As_{стех}}$	$\frac{Fe}{Fe_{стех}}$	$\frac{S}{S_{стех}}$	Si	др.
Молибденит	$\frac{57,80}{59,94}$	–	–	–	–	–	0,60	$\frac{38,60}{40,06}$	–	3,00
Стибнит	–	$\frac{68,30}{71,68}$	–	–	–	–	3,80	$\frac{19,60}{28,32}$	8,10	0,20
Галенит	–	–	$\frac{83,90}{86,60}$	1,20	0,10	–	0,70	$\frac{12,70}{13,40}$	–	1,40
Пирит	–	–	–	–	1,30	–	$\frac{44,90}{46,55}$	$\frac{53,80}{53,45}$	–	–
Арсенопирит	–	–	–	–	0,20	$\frac{43,20}{46,01}$	$\frac{32,50}{34,30}$	$\frac{19,50}{19,69}$	–	4,6
Халькопирит	–	–	–	–	$\frac{34,50}{34,63}$	–	$\frac{30,00}{30,43}$	$\frac{35,50}{34,94}$	–	–

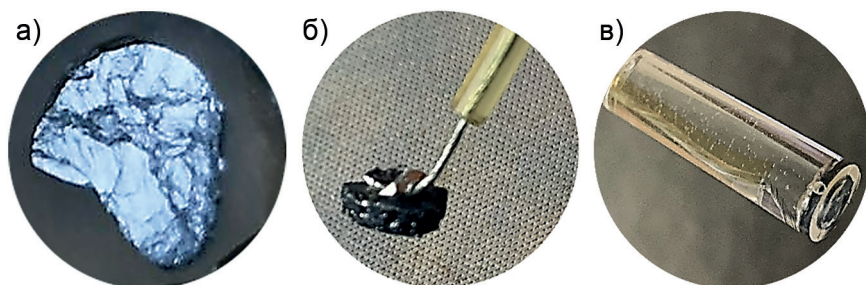


Рис. 1. Методика изготовления минеральных электродов сульфидных минералов  
 Fig. 1. Process for the handicraft sulfide mineral electrodes

SMZ 1500 (Nikon, Япония) для выделения монокристаллических участков. Выделенные участки размером  $10 \times 5 \times 5$  мм отрезались с помощью автоматического отрезного станка Mecatome T300 (Presi, Франция) с водоохлаждающей системой алмазного диска. Элементный анализ выделенных участков выполнен на СЭМ Quanta 650 с энергодисперсионной приставкой EDS (MLA 650) и РФА (Elvax Light SSD) (табл. 1).

В экспериментах в качестве регулятора pH использованы 5%-ные растворы  $H_2SO_4$ , NaOH и  $Ca(OH)_2$ , в качестве модификаторов среды — пероксид ( $H_2O_2$ ), сернистый натрий ( $Na_2S$ ) и тиосульфат натрия ( $Na_2S_2O_3$ ).

Методика изготовления минеральных электродов состоит из следующих этапов: на образцы сульфидов припаивается проводник исполнения COAX-D-AE индиевым припоем с помощью терморегулируемого ( $80 - 350$  °C) паяльника DT70 (CXG, КНР) мощностью 70 Вт. Полученная система закрепляется в цилиндрический пластиковый стержень с помощью двухкомпонентной эпоксидной смолы Акерох 1005 (Akemi, ФРГ) с модифицированным полиаминным отвердителем и далее устанавливается в BNC-разъем.

Перед измерением электродных потенциалов минеральные электроды предварительно полируются на шлифовально-полировальной установке Roto

Pol-35 (Struers, Дания) с насадкой PdM-Force-20 (рис. 1).

Расчет энергии кристаллической решетки, характеризующей физико-химические свойства сульфидных минералов, выполнен по А.Е. Ферсману:

$$U = 256,1 \times (\sum (I_n + k_n)), \quad (1)$$

где  $I$  — число ионов в химическом соединении;  $k$  — энергетические коэффициенты Ферсмана.

Потенциометрические измерения E, pH, Eh (ОВП) выполнены на оригинальной автоматизированной установке, оснащенной термостатированной ячейкой (объемом 380 мл) с регулируемой механической мешалкой. Применялись ионометры pH и ОВП, позволяющие фиксировать pH, ОВП, электродные потенциалы ионоселективных электродов 1-го и 2-го рода в реальном времени (все могут работать до 5 электродов). Электродом сравнения в парах с pH-электродом и ОВП был хлорсеребряный электрод.

Измерения pH проводились с помощью электрода ЭС-10603 и электрода сравнения ЭСр-10103; измерения ОВП — платиновым электродом ЭПВ-1 и электродом сравнения ЭСр-10103. Для управления и сбора информации использован компьютер с дополнительно установленным параллельным портом, по управляющим и информационным шинам которого передаются сигналы управления процессом перемешивания, переключе-

1 – системные блоки  
(управляемый и измерительный)  
2 – иономеры, 2 ед.



Рис. 2. Автоматизированная установка с термостатированной ячейкой для потенциметрических измерений

Fig. 2. Automate device with thermostatically cell for potentiometric measurements

ния измерительных электродов и считывания данных с аналого-цифрового преобразователя. Подача модификаторов ( $H_2O_2$ ,  $Na_2S$ ,  $Na_2S_2O_3$ ) или других химических соединений в ячейку осуществляется интегрированным перистальтическим насосом, который позволяет определить концентрацию модификаторов в ячейке за счет известной скорости подачи (рис. 2). Методика кинетических потенциметрических исследований приведена в [20].

### Результаты и их обсуждение

Физико-химические свойства сульфидных минералов зависят от морфологии, строения атомов, химических и энергетических свойств кристаллов. Химической термодинамикой установлена взаимосвязь устойчивости химических соединений с теплотой их образования. Согласно термохимии, наибольшей устойчивостью обладают химические соединения, образование которых сопровождается наибольшим выделением теплоты.

В табл. 2 приведены результаты расчета энергии кристаллической решетки сульфидных минералов.

Теоретические расчеты энергии кристаллических решеток сульфидных минералов показывают, что косвенно наибольшей устойчивостью обладают молибденит, арсенопирит и стибнит.

Энергия кристаллической решетки:  $MoS_2 < FeAsS < Sb_2S_3 < CuFeS_2 < FeS_2 < PbS$ .

Расчетная реакционная способность и окисляемость сульфидов:  $Sb_2S_3 < MoS_2 < PbS < CuFeS_2 < FeAsS < FeS_2$  [21].

В результате исследований флотоактивности сульфидов крупностью  $-44+10$  мкм в трубке Халлимонта бутиловым ксантогенатом в нейтральной среде получен следующий ряд [21]:  $MoS_2 > Sb_2S_3 > PbS > FeS_2 > CuFeS_2 > FeAsS$ .

Анализ реакционной способности, окисляемости и флотоактивности сульфидов показал, что наиболее гидрофобны молибденит, стибнит и галенит, что согласуется с результатами расчета энергии кристаллической решетки минералов. Галенит обладает наименьшей энергией кристаллической решетки, что, возможно, связано с меньшим энергетическим коэффициентом  $Pb^{2+}$ .

Таблица 2

**Результаты расчета для оценки энергии кристаллической решетки сульфидных минералов**

**Calculation results for estimating the crystal lattice energy of sulfide minerals**

Минералы	Радиус ионов, Å	Энергетические коэффициенты Ферсмана	U, Ккал/моль
Молибденит	Mo <sup>4+</sup> = 0,68 S <sup>2-</sup> = 1,74	Mo <sup>4+</sup> = 8,5 S <sup>2-</sup> = 1,15	2766
Арсенопирит	Fe <sup>3+</sup> = 0,67 As <sup>3-</sup> = 1,70 S <sup>2-</sup> = 1,74	Fe <sup>3+</sup> = 5,15 As <sup>3-</sup> = 2,65 S <sup>2-</sup> = 1,15	2292
Стибнит	Sb <sup>3+</sup> = 1,95 S <sup>2-</sup> = 1,74	Sb <sup>3+</sup> = 2,3 S <sup>2-</sup> = 1,15	2062
Халькопирит	Cu <sup>+</sup> = 0,96 Fe <sup>2+</sup> = 0,83 S <sup>2-</sup> = 1,74	Cu <sup>+</sup> = 0,7 Fe <sup>2+</sup> = 2,12 S <sup>2-</sup> = 1,15	1311
Пирит	Fe <sup>2+</sup> = 0,83 S <sup>2-</sup> = 1,74	Fe <sup>2+</sup> = 2,12 S <sup>2-</sup> = 1,15	1132
Галенит	Pb <sup>2+</sup> = 1,32 S <sup>2-</sup> = 1,74	Pb <sup>2+</sup> = 1,65 S <sup>2-</sup> = 1,15	717

Вместе с тем окислительно-восстановительные процессы на поверхности сульфидов оказывают существенное влияние на процесс взаимодействия флотационных реагентов с минералами.

Адсорбция собирателей, а также взаимодействие окислительно-восстановительных ионов изменяют электродный

потенциал поверхности минералов. С одной стороны, измерения электродного потенциала сульфидов позволяют определить состояние минеральной поверхности, с другой — оценить условия достижения изоэлектрического состояния поверхности минералов и их флотационных свойств.

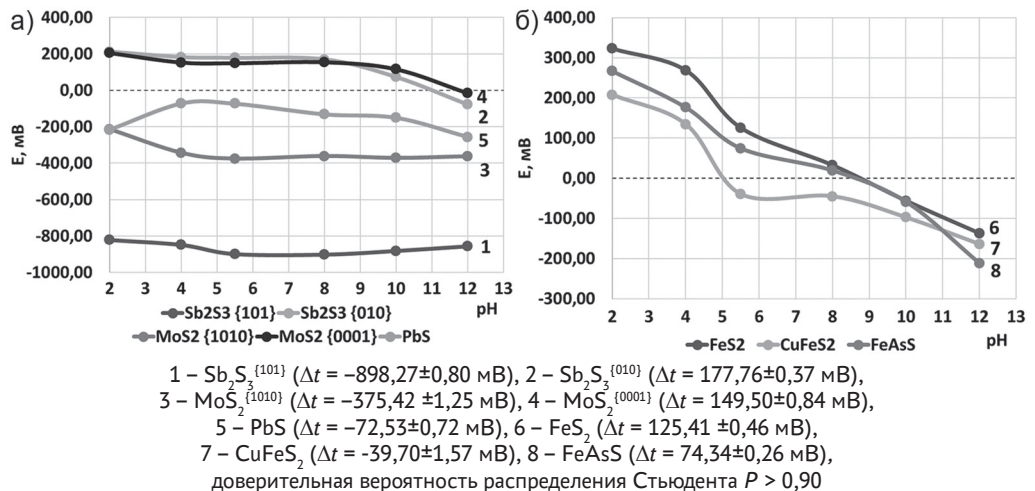
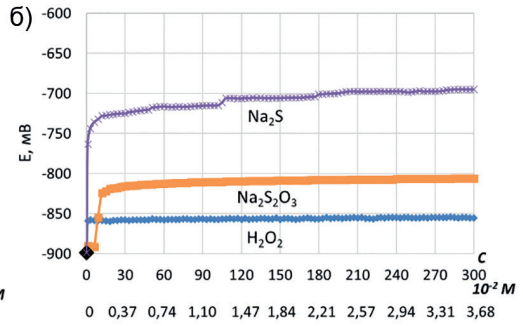


Рис. 3. Зависимость электродного потенциала минеральных электродов от pH среды

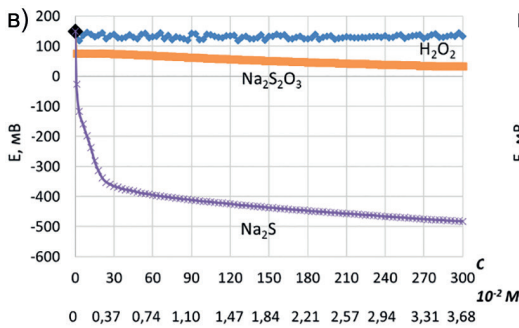
Fig. 3. Electrode potential sulfide versus pH



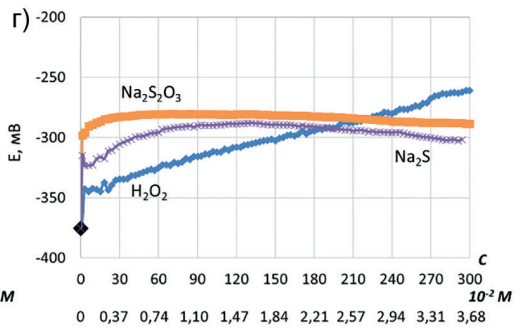
$H_2O_2: \Delta t = +165,80 \pm 4,74 \text{ мВ};$   
 $Na_2S_2O_3: \Delta t = -135,82 \pm 5,40 \text{ мВ};$   
 $Na_2S: \Delta t = -343,92 \pm 9,16 \text{ мВ}$



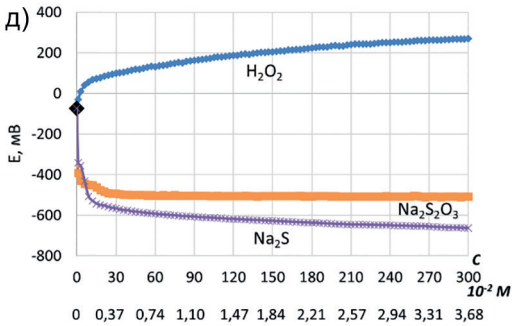
$H_2O_2: \Delta t = -857,94 \pm 1,00 \text{ мВ};$   
 $Na_2S_2O_3: \Delta t = -890,66 \pm 0,99 \text{ мВ};$   
 $Na_2S: \Delta t = -726,35 \pm 1,09 \text{ мВ}$



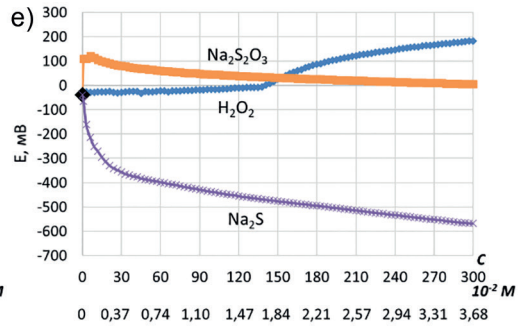
$H_2O_2: \Delta t = +134,41 \pm 8,51 \text{ мВ};$   
 $Na_2S_2O_3: \Delta t = +76,15 \pm 0,44 \text{ мВ};$   
 $Na_2S: \Delta t = -377,34 \pm 5,03 \text{ мВ}$



$H_2O_2: \Delta t = -342,47 \pm 2,46 \text{ мВ};$   
 $Na_2S_2O_3: \Delta t = -291,35 \pm 4,29 \text{ мВ};$   
 $Na_2S: \Delta t = -320,24 \pm 2,96 \text{ мВ}$



$H_2O_2: \Delta t = +267,36 \pm 1,29 \text{ мВ};$   
 $Na_2S_2O_3: \Delta t = -501,41 \pm 0,67 \text{ мВ};$   
 $Na_2S: \Delta t = -661,59 \pm 0,96 \text{ мВ}$



$H_2O_2: \Delta t = +179,63 \pm 2,68 \text{ мВ};$   
 $Na_2S_2O_3: \Delta t = +72,59 \pm 3,52 \text{ мВ};$   
 $Na_2S: \Delta t = -564,76 \pm 2,38 \text{ мВ}$

Рис. 4. Кинетические зависимости электродного потенциала минеральных электродов сульфидов от концентрации  $H_2O_2$ ,  $Na_2S_2O_3$ ,  $Na_2S$  в дистиллированной воде ( $pH_{исх.} 5,5$ ):  $Sb_2S_3^{(010)}$  (а);  $Sb_2S_3^{(101)}$  (б);  $MoS_2^{(0001)}$  (в);  $MoS_2^{(1010)}$  (г);  $PbS$  (д);  $CuFeS_2$  (е);  $\blacklozenge$  – дистиллированная вода; доверительная вероятность распределения Стьюдента  $P > 0,90$

Fig. 4. Kinetic curves of the electrode potential of sulfide mineral electrodes on the concentration of  $H_2O_2$ ,  $Na_2S_2O_3$ ,  $Na_2S$  in distilled water ( $pH_{ref.} 5.5$ ):  $Sb_2S_3^{(010)}$  (a);  $Sb_2S_3^{(101)}$  (b);  $MoS_2^{(0001)}$  (v);  $MoS_2^{(1010)}$  (g);  $PbS$  (d);  $CuFeS_2$  (e);  $\blacklozenge$  – distilled water; confidence probability of Student's distribution  $P > 0.90$



На рис. 3 приведены результаты измерений электродного потенциала сульфидных минералов при разных условиях подготовки и величинах pH.

Стибнит обладает совершенной спайностью по грани {010} и несовершенной по торцу {101}. Молибденит обладает весьма совершенной спайностью по грани {0001} и несовершенной по торцу {1010}.

Электродный потенциал минеральных электродов стибнита и молибденита, подготовленных по грани и торцу, отличается по значениям потенциала в дистиллированной воде, по грани  $E_{\text{Sb}_2\text{S}_3}^{\{010\}} = +177,76$  мВ и  $E_{\text{MoS}_2}^{\{0001\}} = +149,5$  мВ и по торцам кристаллов сульфидов  $E_{\text{Sb}_2\text{S}_3}^{\{101\}} = -898,27$  мВ и  $E_{\text{MoS}_2}^{\{1010\}} = -375,42$  мВ.

В диапазоне 2–12 pH электродный потенциал стибнита и молибденита по грани остается в положительной области вплоть до pH 10 и переходит в отрицательную область ( $E_{\text{Sb}_2\text{S}_3}^{\{010\}} = -77,46$  мВ и  $E_{\text{MoS}_2}^{\{0001\}} = -15,79$  мВ) в сильнощелочной известковой среде (pH > 11). По торцу электродный потенциал остается в отрицательной области на всем диапа-

зоне исследуемого pH. В сравнении со стибнитом и молибденитом отрицательное значение электродного потенциала галенита сдвигается при pH 2–7 в окислительную область, с повышением щелочности среды (pH 8–12) — переходит в восстановительную.

В отличие от трудноокисляемых сульфидов величина электродного потенциала пирита, арсенопирита и халькопирита переходит в отрицательную область с повышением pH > 8.

Установлено, что значения электродных потенциалов и реакция способность отличаются для минеральных электродов стибнита и молибденита, изготовленных по спайности и торцам.

Изучены влияния на электродный потенциал сульфидов — модификаторов среды при флотации — сернистого натрия, тиосульфата натрия и пероксида водорода в дистиллированной воде pH<sub>исх.</sub> 5,5 (рис. 4).

В присутствии окислителя ( $\text{H}_2\text{O}_2$ ) электродный потенциал стибнита {010} сдвигается в окислительную область с +177,76 до +237,56 мВ, а электродный потенциал молибденита {0001} не изменя-

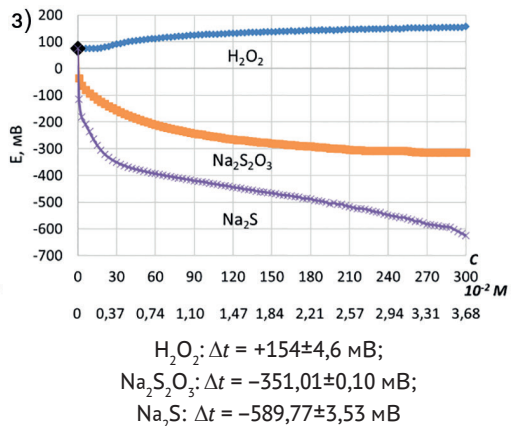
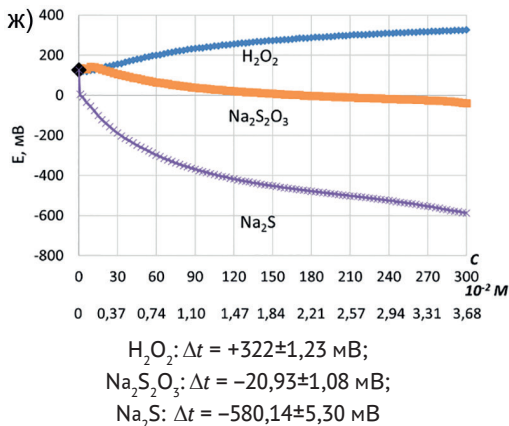


Рис. 4. Кинетические зависимости электродного потенциала минеральных электродов сульфидов от концентрации  $\text{H}_2\text{O}_2$ ,  $\text{Na}_2\text{S}_2\text{O}_3$ ,  $\text{Na}_2\text{S}$  в дистиллированной воде (pH<sub>исх.</sub> 5,5);  $\text{FeS}_2$  (ж);  $\text{FeAsS}$  (з);  $\blacklozenge$  — дистиллированная вода; доверительная вероятность распределения Стьюдента  $P > 0,90$

Fig. 4. Kinetic curves of the electrode potential of sulfide mineral electrodes on the concentration of  $\text{H}_2\text{O}_2$ ,  $\text{Na}_2\text{S}_2\text{O}_3$ ,  $\text{Na}_2\text{S}$  in distilled water (pH<sub>init.</sub> 5.5);  $\text{FeS}_2$  (zh);  $\text{FeAsS}$  (z);  $\blacklozenge$  — distilled water; confidence probability of Student's distribution  $P > 0.90$

ется и колеблется в диапазоне от +133,20 до +149,50 мВ; отрицательные значения потенциала минерального электрода стибнита {101} и молибденита {1010} уменьшаются с -898,26 до -855,30 мВ и с -375,41 до -260,65 мВ в соответствии с концентрацией пероксида водорода.

При введении в реактор восстановителей электродный потенциал стибнита {010} переходит в восстановительную область с +177,76 до -108,16 мВ ( $\text{Na}_2\text{S}_2\text{O}_3$ ) и с +177,76 до -513,63 мВ ( $\text{Na}_2\text{S}$ ). Электродный потенциал молибденита {0001}, аналогично, уменьшается с  $\text{Na}_2\text{S}_2\text{O}_3$  (с +149,50 до +32,92 мВ) и с  $\text{Na}_2\text{S}$  переходит в восстановительную область (с +149,50 мВ до -482,12 мВ). Отрицательное значение электродного потенциала стибнита {101} и молибденита {1010} нехарактерно сдвигается в окислительную область в присутствии  $\text{Na}_2\text{S}_2\text{O}_3$  и  $\text{Na}_2\text{S}$ .

Экспериментально установлено, что молибденит и стибнит в зависимости от

условия их подготовки — по спайности или перпендикулярно спайности — обладают анизотропией поверхностных свойств кристаллов [22], влияющей на поверхностные свойства сульфидов.

В отличие от молибденита и стибнита электродный потенциал галенита, пирита, арсенопирита и халькопирита ожидается сдвигается в окислительную область при введении  $\text{H}_2\text{O}_2$  и смещается в отрицательную область в присутствии  $\text{Na}_2\text{S}_2\text{O}_3$  и  $\text{Na}_2\text{S}$ . Наибольшую разницу электродного потенциала сульфидных минералов создает  $\text{Na}_2\text{S}$  в сравнении с  $\text{Na}_2\text{S}_2\text{O}_3$ .

Определены скорости изменения электродных потенциалов сульфидов в присутствии  $\text{H}_2\text{O}_2$ ,  $\text{Na}_2\text{S}$ ,  $\text{Na}_2\text{S}_2\text{O}_3$  в дистиллированной воде  $\text{pH}_{\text{исх.}}$  5,5 (табл. 3).

Полученные экспериментальные результаты показали влияние условий подготовки кристаллов минеральных электродов на  $\vartheta$  изменения электродных по-

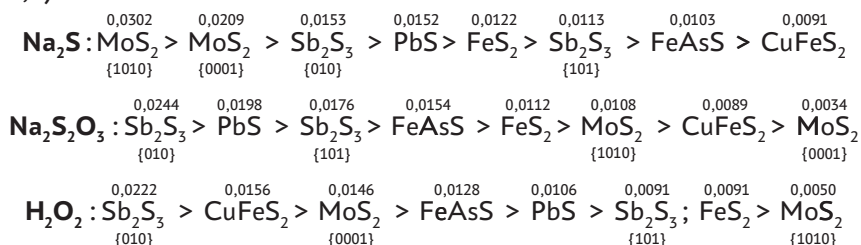
Таблица 3

**Скорость ( $\vartheta$ ) изменения электродных потенциалов сульфидов**  
**The speed ( $\vartheta$ ) changes of electrode potential of sulfides**

Минеральный электрод	Условия подготовки	Без модификатора		$\text{Na}_2\text{S}$		$\text{Na}_2\text{S}_2\text{O}_3$		$\text{H}_2\text{O}_2$	
		$\vartheta$ , мВ·с <sup>-1</sup>	$\Delta E$ , мВ	$\vartheta$ , мВ·с <sup>-1</sup>	$\Delta E$ , мВ	$\vartheta$ , мВ·с <sup>-1</sup>	$\Delta E$ , мВ	$\vartheta$ , мВ·с <sup>-1</sup>	$\Delta E$ , мВ
$\text{Sb}_2\text{S}_3$	{010} грань	0,0103	+7,56	0,0153	+618,50	0,0244	+287,50	0,0222	-53,38
$\text{MoS}_2$	{0001} грань	0,0139	+1,40	0,0209	+631,62	0,0034	+116,57	0,0146	+17,17
$\text{Sb}_2\text{S}_3$	{101} торец	0,0082	-5,73	0,0113	-192,66	0,0176	-89,70	0,0091	-41,29
$\text{MoS}_2$	{1010} торец	0,0113	+20,63	0,0302	-85,98	0,0108	-17,76	0,0050	-114,76
$\text{PbS}$	{100} грань	0,0079	+68,50	0,0152	+555,45	0,0198	+431,63	0,0106	-249,11
$\text{FeS}_2$	{100} грань	0,0083	+17,39	0,0122	+578,16	0,0112	+96,22	0,0091	-119,50
$\text{FeAsS}$	{101} грань	0,0069	+4,93	0,0103	+540,40	0,0154	+328,64	0,0128	-54,05
$\text{CuFeS}_2$	{112} грань	0,0178	+30,37	0,0091	+436,90	0,0089	-83,05	0,0156	-169,69

тенциалов. Стибнит, приготовленный по спайности {010}, обладает наибольшей  $\vartheta$  изменения электродных потенциалов в присутствии как  $\text{Na}_2\text{S}_2\text{O}_3$  ( $0,0244 \text{ E}\cdot\text{c}^{-1}$ ), так и  $\text{H}_2\text{O}_2$  ( $0,0222 \text{ E}\cdot\text{c}^{-1}$ ), в сравнении с  $\text{MoS}_2$  {0001} ( $0,0034$  и  $0,0146 \text{ E}\cdot\text{c}^{-1}$ ), за исключением  $\text{Na}_2\text{S}$ , где  $\vartheta$  изменения электродного потенциала выше у  $\text{MoS}_2$  {0001} ( $0,0209 \text{ E}\cdot\text{c}^{-1}$ ). В случае стибнита и молибденита, приготовленных по торцам,  $\text{Sb}_2\text{S}_3$  {101} также обладает наибольшей  $\vartheta$  изменения электродного потенциала с  $\text{Na}_2\text{S}_2\text{O}_3$  и  $\text{H}_2\text{O}_2$  ( $0,0176$  и  $0,0091 \text{ E}\cdot\text{c}^{-1}$ ) в сравнении с  $\text{MoS}_2$  {1010} ( $0,0144$  и  $0,0050 \text{ E}\cdot\text{c}^{-1}$ ), за исключением  $\text{Na}_2\text{S}$ , где  $\vartheta$  изменения электродного потенциала выше у  $\text{MoS}_2$  {0001} ( $0,0302 \text{ E}\cdot\text{c}^{-1}$ ).

Получен следующий ряд  $\vartheta$  изменения электродных потенциалов минеральных электродов при введении модификаторов флотации в дистиллированную воду ( $\text{pH}_{\text{исх.}} 5,5$ ):



С модификаторами более реакционноспособны грани (плоскости) стибнита, молибденит более устойчив к поверхностным окислительно-восстановительным реакциям, чем стибнит, за исключением реакции с сернистым натрием.

Также определены  $\vartheta$  изменения электродных потенциалов минеральных электродов в присутствии модификаторов в кислой и щелочной среде (табл. 4).

С повышением щелочности среды (с  $\text{pH}$  4 до 10)  $\vartheta$  изменения электродного потенциала стибнита снижается, молибденит более устойчив к окислительно-восстановительным процессам в слабокислых средах, с увеличением щелочности среды

Таблица 4

**Скорость ( $\vartheta$ ) изменения электродных потенциалов сульфидов при  $\text{pH}$  4 и 10**  
**The speed ( $\vartheta$ ) changes of electrode potential of sulfides at  $\text{pH}$  4 & 10**

Минеральный электрод	Условия подготовки	Без модификатора		$\text{Na}_2\text{S}$		$\text{Na}_2\text{S}_2\text{O}_3$		$\text{H}_2\text{O}_2$	
		$\text{pH}$ 4	$\text{pH}$ 10	$\text{pH}$ 4	$\text{pH}$ 10	$\text{pH}$ 4	$\text{pH}$ 10	$\text{pH}$ 4	$\text{pH}$ 10
$\text{Sb}_2\text{S}_3$	{010} грань	0,0162	0,0143	0,0239	0,0146	0,0231	0,0278	0,0212	0,0194
$\text{MoS}_2$	{0001} грань	0,0128	0,0164	0,0090	0,0095	0,0031	0,0051	0,0048	0,0053
$\text{Sb}_2\text{S}_3$	{101} торец	0,0047	0,0017	0,0184	0,0200	0,0159	0,0158	0,0135	0,0079
$\text{MoS}_2$	{1010} торец	0,0068	0,0067	0,0124	0,0409	0,0058	0,0206	0,0063	0,0050
$\text{FeS}_2$	{100} грань	0,0088	0,0066	0,0218	0,0200	0,0186	0,0059	0,0164	0,0029
$\text{CuFeS}_2$	{112} грань	0,0043	0,0090	0,0149	0,0178	0,0071	0,0096	0,0060	0,0108

растет и  $\varphi$  изменения электродного потенциала.

### Заключение

Совокупность выполненных экспериментальных исследований позволила впервые установить анизотропию электродных потенциалов минеральных электродов  $Sb_2S_3$  и  $MoS_2$  в зависимости от условия их подготовки (по спайности или перпендикулярно спайности), влияющих как на поверхностные, так и на технологические (флотационные) свойства сульфидов.

Установлено, что в присутствии модификаторов более реакционноспособны грани (плоскости) стибнита, чем торцы; молибденит более устойчив к поверхностным окислительно-восстановительным реакциям, чем стибнит.

С повышением щелочности среды скорость изменения электродного потен-

циала стибнита снижается, что согласуется с известными данными об уменьшении реакционной способности стибнита в щелочной среде. У молибденита, напротив, в щелочной среде растет скорость изменения электродного потенциала, что указывает на большую реакционную способность молибденита в щелочной среде по сравнению со стибнитом, что согласуется с извлечением молибденита в щелочной среде в случае применения сульфидрильных ионогенных собирателей.

Полученные результаты исследований объясняют особенности взаимодействия модификаторов с поверхностью трудноокисляемых сульфидов в зависимости от условия подготовки и щелочности среды, что может быть использовано при решении научно-практической задачи повышения контрастности флотации тонковкрапленных руд.

### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Madzokere Tatenda Crispin, Nheta Willie, Gumbochuma Sheunopa* Advances of nanotechnology applications in mineral froth flotation technology / Application of nanotechnology in mining processes: Beneficiation and sustainability. Chapter 8. 2022, pp. 289–326. DOI: 10.1002/9781119865360.ch8.

2. *Чантурия В. А., Козлов П. А.* Современные проблемы комплексной переработки труднообогатимых руд и техногенного сырья / Материалы Международной научной конференции «Плаксинские чтения». — Красноярск, 2017. — С. 3–6.

3. *Чантурия В. А., Бочаров В. А.* Современное состояние и основные направления развития технологии комплексной переработки минерального сырья цветных металлов // Цветные металлы. — 2016. — № 11. — С. 11–18. DOI: 10.17580/tsm.2016.11.01.

4. *Metin Can N., Çağrı Başaran* Effects of different grinding media and milling conditions on the flotation performance of a copper-pyrite ore // Minerals. 2023, vol. 13, no. 1, article 85. DOI: 10.3390/min13010085.

5. *Морозов Ю. П., Интогарова Т. И., Валиева О. С., Донец Ю. О.* Флотоклассификация в замкнутом цикле измельчения как один из способов снижения переизмельчения сульфидных руд // Известия вузов. Горный журнал. — 2021. — № 1. — С. 85–96. DOI: 10.21440/0536-1028-2021-1-85-96.

6. *Плаксин И. Н., Шафеев Р. Ш.* Влияние электрохимической неоднородности поверхности сульфидных минералов на распределение ксантогената в условиях флотации // Доклады Академии наук СССР (раздел «Химическая технология»). — 1958. — Т. 121. — № 1. — С. 145–148.

7. *Castro S., Lopez-Valdivieso A., Laskowski J. S.* Review of the flotation of molybdenite. Part I: Surface properties and floatability // International Journal of Mineral Processing. 2016, vol. 148, pp. 48–58. DOI: 10.1016/j.minpro.2016.01.003.

8. *Xiaoqin Tang, Ye Chen* A review of flotation and selective separation of pyrrhotite. A perspective from crystal structures // *International Journal of Mining Science and Technology*. 2022, vol. 32, no. 4, pp. 847 – 863. DOI: 10.1016/j.ijmst.2022.06.001.

9. *Yi G., Macha E., Van J. Dyke, Ed R. Macha, McKay T., Free M. L.* Recent progress on research of molybdenite flotation. A review // *Advances in Colloid and Interface Science*. 2021, vol. 295, no. 4, article 102466. DOI: 10.1016/j.cis.2021.102466.

10. *Chimonyo W., Corin K. C., Wiese J. G., O'Connor C. T.* Redox potential control during flotation of a sulphide mineral ore // *Minerals Engineering*. 2017, vol. 110, pp. 57 – 64. DOI: 10.1016/j.mineng.2017.04.011.

11. *Игнаткина В. А., Аксенова Д. Д., Каюмов А. А., Ергешева Н. Д.* Пероксид водорода в реагентных режимах флотации колчеданных медных руд // *Физико-технические проблемы разработки полезных ископаемых*. – 2022. – № 1. – С. 139 – 152. DOI: 10.15372/FTPRPI20220115.

12. *Chen Y., Chen X., Peng Y.* The effect of sodium hydrosulfide on molybdenite flotation as a depressant of copper sulfides // *Minerals Engineering*. 2020, vol. 148, no. 15, article 106203. DOI: 10.1016/j.mineng.2020.106203.

13. *Vazife J., Pourghahramani P., Asqarian H., Bagherian A.* Effects of pH and pulp potential on selective separation of Molybdenite from the Sungun Mine Cu-Mo concentrate // *International Journal of Mining and Geo-Engineering*. 2017, vol. 51, no. 2, pp. 147 – 150. DOI: 10.22059/IJMGE.2017.220005.594638.

14. *Соложенкин П. М., Зинченко З. А.* Обогащение сурьмяных руд. – М.: Наука, 1985. – 180 с.

15. *Qian Zhang, Shuming Wen, Qicheng Feng, Genping Huang* Interaction mechanism of lead ions with stibnite surfaces and enhancement of xanthate adsorption // *Journal of Molecular Liquids*. 2021, vol. 331, article 115802. DOI: 10.1016/j.molliq.2021.115802.

16. *Игнаткина В. А., Каюмов А. А., Ергешева Н. Д., Чернова П. А.* Флотуемость трудноокисляемых сульфидов молибдена и сурьмы в контролируемых окислительно-восстановительных условиях // *Физико-технические проблемы разработки полезных ископаемых*. – 2023. – № 1. – С. 145 – 160. DOI: 10.15372/FTPRPI20230114.

17. *Соложенкин П. М.* Взаимодействия минералов сурьмы с катионами свинца, сульфгидрильными реагентами на основе молекулярного моделирования / *Научные основы и практика переработки руд и техногенного сырья: Материалы XXV Международной научно-технической конференции*. – Екатеринбург: Изд-во «Форт Диалог-Исеть», 2020. – С. 74 – 77.

18. *Segura-Salazar J., Brito-Parada P. R.* Stibnite froth flotation. A critical review // *Minerals Engineering*. 2021, vol. 163, article 106713. DOI: 10.1016/j.mineng. 2020.106713.

19. *Zhengyao Li, Yuanyuan Wang, Muxin Jia, Ligang Wen, Xuewen Wang, Jinzhi Wei* Effect and mechanism of depressant disodium carboxymethyl trithiocarbonate on flotation separation of stibnite and pyrite // *Mining Metallurgy & Exploration*. 2022, vol. 39, pp. 1267 – 1275. DOI: 10.1007/s42461-022-00582-4.

20. *Каюмов А. А.* Повышение эффективности флотации теннантита из колчеданной медно-цинковой руды на основе селективных реагентных режимов флотации: Автореф. дис. ... канд. техн. наук. – М.: НИТУ «МИСиС», 2019. – 27 с.

21. *Игнаткина В. А., Каюмов А. А., Ергешева Н. Д.* Флотоактивность и расчетная реакционная способность сульфидных минералов и золота // *Известия вузов. Цветная металлургия*. – 2022. – Т. 28. – № 4. – С. 4 – 14. DOI: 10.17073/0021-3438-2022-4-4-14.

22. *Chanturiya V. A., Krasavtseva E. A., Makarov D. V.* Electrochemistry of sulfides: Process and environmental aspects // *Sustainability*. 2022, vol. 14, article 11285. DOI: 10.3390/su141811285. **ГИАБ**

## REFERENCES

1. Madzokere Tatenda Crispin, Nheta Willie, Gumbochuma Sheunopa Advances of nanotechnology applications in mineral froth flotation technology. *Application of nanotechnology in mining processes: Beneficiation and sustainability*. Chapter 8. 2022, pp. 289–326. DOI: 10.1002/9781119865360.ch8.
2. Chanturia V. A., Kozlov P. A. Modern problems of complex processing of refractory ores and technogenic raw materials. *Materialy Mezhdunarodnoy nauchnoy konferentsii «Plaksinские chteniya»* [Materials of the International Scientific Conference «Plaksin readings»], Krasnoyarsk, 2017, pp. 3–6. [In Russ].
3. Chanturiya V. A., Bocharov V. A. Modern state and basic ways of technology development for complex processing of non-ferrous mineral raw materials. *Tsvetnye Metally*. 2016, no. 11, pp. 11–18. [In Russ]. DOI: 10.17580/tsm.2016.11.01.
4. Metin Can N., Çağrı Başaran Effects of different grinding media and milling conditions on the flotation performance of a copper-pyrite ore. *Minerals*. 2023, vol. 13, no. 1, article 85. DOI: 10.3390/min13010085.
5. Morozov Yu. P., Intogarova T. I., Valieva O. S., Donets Lu. O. Flotation classification in closed circuit grinding as a way of reducing sulfide ore overgrinding. *Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedenii. Gornyi zhurnal*. 2021, no. 1, pp. 85–96. [In Russ]. DOI: 10.21440/0536-1028-2021-1-85-96.
6. Plaksin I. N., Shafeev R. Sh. Influence of electrochemical inhomogeneity of the surface of sulfide minerals on xanthate distribution under flotation conditions. *Doklady Akademii nauk SSSR*. 1958, vol. 121, no. 1, pp. 145–148. [In Russ].
7. Castro S., Lopez-Valdivieso A., Laskowski J. S. Review of the flotation of molybdenite. Part I: Surface properties and floatability. *International Journal of Mineral Processing*. 2016, vol. 148, pp. 48–58. DOI: 10.1016/j.minpro.2016.01.003.
8. Xiaoqin Tang, Ye Chen A review of flotation and selective separation of pyrrhotite. A perspective from crystal structures. *International Journal of Mining Science and Technology*. 2022, vol. 32, no. 4, pp. 847–863. DOI: 10.1016/j.ijmst.2022.06.001.
9. Yi G., Macha E., Van J. Dyke, Ed R. Macha, McKay T., Free M. L. Recent progress on research of molybdenite flotation. A review. *Advances in Colloid and Interface Science*. 2021, vol. 295, no. 4, article 102466. DOI: 10.1016/j.cis.2021.102466.
10. Chimonyo W., Corin K. C., Wiese J. G., O'Connor C. T. Redox potential control during flotation of a sulphide mineral ore. *Minerals Engineering*. 2017, vol. 110, pp. 57–64. DOI: 10.1016/j.mineng.2017.04.011.
11. Ignatkina V. A., Aksenova D. D., Kayumov A. A. et al. Hydrogen peroxide in reagent regimes in copper sulphide ore flotation. *Fiziko-tehnicheskiye problemy razrabotki poleznykh iskopaemykh*. 2022, no. 1, pp. 139–152. [In Russ]. DOI: 10.15372/FTPRPI20220115.
12. Chen Y., Chen X., Peng Y. The effect of sodium hydrosulfide on molybdenite flotation as a depressant of copper sulfides. *Minerals Engineering*. 2020, vol. 148, no. 15, article 106203. DOI: 10.1016/j.mineng.2020.106203.
13. Vazife J., Pourghahramani P., Asqarian H., Bagherian A. Effects of pH and pulp potential on selective separation of Molybdenite from the Sungun Mine Cu-Mo concentrate. *International Journal of Mining and Geo-Engineering*. 2017, vol. 51, no. 2, pp. 147–150. DOI: 10.22059/IJMGE.2017.220005.594638.
14. Solozhenkin P. M., Zinchenko Z. A. *Obogashchenie sur'myanykh rud* [Enrichment of antimony ores], Moscow, Nauka, 1985, 180 p.
15. Qian Zhang, Shuming Wen, Qicheng Feng, Genping Huang Interaction mechanism of lead ions with stibnite surfaces and enhancement of xanthate adsorption. *Journal of Molecular Liquids*. 2021, vol. 331, article 115802. DOI: 10.1016/j.molliq.2021.115802.
16. Ignatkina V. A., Kayumov A. A., Ergesheva N. D., Chernova P. A. Floatability of low-oxidizable molybdenum and antimony sulfides in controlled oxidation-reduction conditions.

*Fiziko-tekhnicheskkiye problemy razrabotki poleznykh iskopaemykh*. 2023, no. 1, pp. 145 – 160. [In Russ]. DOI: 10.15372/FTPRPI20230114.

17. Solozhenkin P. M. Interactions of antimony minerals with lead cations, sulfhydryl reagents based on molecular modeling. *Nauchnye osnovy i praktika pererabotki rud i tekhnogennogo syr'ya. Materialy XXV Mezhdunarodnoy nauchno-tekhnicheskoy konferentsii* [Scientific bases and practice of processing ores and technogenic raw materials. Materials of the XXV International Scientific and Technical Conference], Ekaterinburg, Izd-vo «Fort Dialog-Iset'», 2020, pp. 74 – 77. [In Russ].

18. Segura-Salazar J., Brito-Parada P. R. Stibnite froth flotation. A critical review. *Minerals Engineering*. 2021, vol. 163, article 106713. DOI: 10.1016/j.mineng. 2020.106713.

19. Zhengyao Li, Yuanyuan Wang, Muxin Jia, Ligang Wen, Xuewen Wang, Jinzhi Wei Effect and mechanism of depressant disodium carboxymethyl trithiocarbonate on flotation separation of stibnite and pyrite. *Mining Metallurgy & Exploration*. 2022, vol. 39, pp. 1267 – 1275. DOI: 10.1007/s42461-022-00582-4.

20. Kayumov A. A. *Povyshenie effektivnosti flotatsii tennantita iz kolchedannoy medno-tsinkovoy rudy na osnove selektivnykh reagentnykh rezhimov flotatsii* [Improving the efficiency of tennantite flotation from pyrite copper-zinc ore based on selective reagent regime of flotation], Candidate's thesis, Moscow, NITU «MISiS», 2019, 27 p.

21. Ignatkina V. A., Kayumov A. A., Ergesheva N. D. Floatability and calculated reactivity of gold and sulfide minerals. *Izvestiya vuzov. Tsvetnaya metallurgiya*. 2022, vol. 28, no. 4, pp. 4 – 14. [In Russ]. DOI: 10.17073/0021-3438-2022-4-4-14.

22. Chanturiya V. A., Krasavtseva E. A., Makarov D. V. Electrochemistry of sulfides: Process and environmental aspects. *Sustainability*. 2022, vol. 14, article 11285. DOI: 10.3390/su141811285.

## ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ

Каюмов Абдуазиз Абдурашидович<sup>1</sup> – канд. техн. наук, ведущий инженер, e-mail: maliaby\_92@mail.ru, ORCID ID: 0000-0003-0502-6595,

Игнаткина Владислава Анатольевна<sup>1</sup> – д-р техн. наук, профессор, e-mail: woda@mail.ru, ORCID ID: 0000-0003-2552-206X,

Ергешева Назымарзу Дауренкызы<sup>1</sup> – аспирант, e-mail: nazymarzu.zharolla@mail.ru,

<sup>1</sup> НИТУ «МИСиС».

**Для контактов:** Каюмов А.А., e-mail: maliaby\_92@mail.ru.

## INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

A.A. Kayumov<sup>1</sup>, Cand. Sci. (Eng.), Leading Engineer, e-mail: maliaby\_92@mail.ru, ORCID ID: 0000-0003-0502-6595,

V.A. Ignatkina<sup>1</sup>, Dr. Sci. (Eng.), Professor, e-mail: woda@mail.ru, ORCID ID: 0000-0003-2552-206X,

N.D. Ergesheva<sup>1</sup>, Student, e-mail: nazymarzu.zharolla@mail.ru,

<sup>1</sup> National University of Science and Technology «MISiS», 119049, Moscow, Russia.

**Corresponding author:** A.A. Kayumov, e-mail: maliaby\_92@mail.ru.

Получена редакцией 06.07.2023; получена после рецензии 25.07.2023; принята к печати 10.09.2023.

Received by the editors 06.07.2023; received after the review 25.07.2023; accepted for printing 10.09.2023.