

March 2024

THE EFFECT OF HYDROGEN PEROXIDE AND POTASSIUM AMYLXANTHATE ON THE SURFACE PROPERTIES OF CHALCOCITE AND ENARGITE

Berdakh T. DANIYAROV

Uzbek-Japan Innovation Youth Centre, Tashkent, Uzbekistan, berdakh1997@mail.ru

Hajime MIKI

Department of Mineral Engineering, Faculty of Engineering, Kyushu University, Japan, miki@mine.kyushu-u.ac.jp

Daminbek A. ZIYATOV

National University of Uzbekistan, Tashkent, Uzbekistan, ziatovdamin@gmail.com

Shahlo DAMINOVA

National University of Uzbekistan, Tashkent, Uzbekistan, daminova_sh@mail.ru

Follow this and additional works at: <https://cce.researchcommons.org/journal>

 Part of the [Polymer and Organic Materials Commons](#)

Recommended Citation

DANIYAROV, Berdakh T.; MIKI, Hajime; ZIYATOV, Daminbek A.; and DAMINOVA, Shahlo (2024) "THE EFFECT OF HYDROGEN PEROXIDE AND POTASSIUM AMYLXANTHATE ON THE SURFACE PROPERTIES OF CHALCOCITE AND ENARGITE," *CHEMISTRY AND CHEMICAL ENGINEERING*: Vol. 2023: No. 4, Article 6. DOI: 10.34920/cce202346

Available at: <https://cce.researchcommons.org/journal/vol2023/iss4/6>

This Article is brought to you for free and open access by Chemistry and Chemical Engineering. It has been accepted for inclusion in CHEMISTRY AND CHEMICAL ENGINEERING by an authorized editor of Chemistry and Chemical Engineering. For more information, please contact zuchra_kadirova@yahoo.com.

THE EFFECT OF HYDROGEN PEROXIDE AND POTASSIUM AMYLXANTHATE ON THE SURFACE PROPERTIES OF CHALCOCITE AND ENARGITE

Berdakh DANIYAROV¹ (berdakh1997@mail.ru)

Hajime MIKI³ (miki@mine.kyushu-u.ac.jp)

Daminbek ZIYATOV² (daminujicy@gmail.com)

Shakhlo DAMINOVA^{1,2} (daminova_sh@mail.ru)

¹Uzbek-Japan Innovation Center of Youth, Tashkent, Uzbekistan.

²National University of Uzbekistan, Tashkent, Uzbekistan.

³Department of Mineral Engineering, Faculty of Engineering, Kyushu University, Japan

The effect on the surface properties and floatability of chalcocite and enargite after oxidative treatment with hydrogen peroxide (H_2O_2) in the presence and absence of potassium amylxanthate (PAX) as a collector was studied. In this research, flotation tests were carried out on mixed and individual minerals. Oxidative treatment with hydrogen peroxide had a negative effect on the floatability of chalcocite and enargite. PAX adsorption analysis shows that enargite adsorbs PAX faster than chalcocite. Moreover, Fourier transform infrared spectroscopy analysis shows that PAX was adsorbed in the form of copper amylxanthate on chalcocite and enargite surfaces. In addition, dixanthogen was adsorbed on the surface of enargite, and the surface of chalcocite was more oxidized compared to enargite. Flotation of mixed minerals shows that the floatability of chalcocite was more suppressed compared to enargite after treatment with PAX and H_2O_2 . This result demonstrates the possibility of separating chalcocite and enargite by treating PAX and H_2O_2 at pH 9.

Keywords: chalcocite, enargite, hydrogen peroxide, potassium amylxanthate, flotation

ВЛИЯНИЕ ПЕРОКСИДА ВОДОРОДА И АМИЛКСАНТОГЕНАТА КАЛИЯ НА ПОВЕРХНОСТНЫЕ СВОЙСТВА ХАЛЬКОЗИНА И ЭНАРГИТА

Бердах ДАНИЯРОВ¹ (berdakh1997@mail.ru)

Хажиме МИКИ³ (miki@mine.kyushu-u.ac.jp)

Даминбек ЗИЯТОВ² (daminujicy@gmail.com)

Шахло ДАМИНОВА^{1,2} (daminova_sh@mail.ru)

¹Узбекско-Японский молодежный центр инноваций, Ташкент, Узбекистан

²Национальный университет Узбекистана, Ташкент, Узбекистан

³Департамент инженерии недр, инженерный факультет, Университет Кюсю, Япония

Исследовано влияние на поверхностные свойства и флотуемость халькозина и энаргита после окислительной обработки перексидом водорода (H_2O_2) в присутствии и в отсутствие амилксантогената калия (ПАКС) в качестве коллектора. В данном исследовании были проведены флотационные испытания смешанных и индивидуальных минералов. Окислительная обработка перексидом водорода отрицательно повлияла на флотуемость халькозинов и энаргитов. Анализ адсорбции ПАКС показывает, что энаргит адсорбирует ПАКС быстрее, чем на халькозин. Кроме того, анализ инфракрасной спектроскопии с преобразованием Фурье показывает, что ПАКС адсорбировался в форме амилксантогената меди на поверхностях халькозина и энаргита. Кроме того, диксантоген адсорбировался на поверхности энаргита, а поверхность халькозина была более окислена по сравнению с энаргитом. Флотация смешанных минералов показывает, что флотуемость халькозина был более подавлено по сравнению с энаргитом после обработки ПАКС и H_2O_2 . Этот результат демонстрирует возможность разделения халькозина и энаргита обработкой ПАКС и H_2O_2 при pH 9.

Ключевые слова: халькозин, энаргит, перексид водорода, амилксантогенат калия, флотация

VODOROD PEROKSID VA KALIY AMILKSANTOGENATNING XALKOTSIT VA ENARGITNING SIRT XUSUSIYATLARIGA TA'SIRI

Berdax DANIYAROV¹ (berdakh1997@mail.ru)

Hajime MIKI³ (miki@mine.kyushu-u.ac.jp)

Daminbek ZIYATOV² (daminujicy@gmail.com)

Shaxlo DAMINOVA^{1,2} (daminova_sh@mail.ru)

¹O'zbekiston-Yaponiya yoshlar innovatsiya markazi, Toshkent, O'zbekiston

²O'zbekiston Milliy universiteti, Toshkent, O'zbekiston

³Yer osti muhandisligi bo'limi, muhandislik fakulteti, Kyushu universiteti, Yaponiya

Kollektor sifatida kaliy amilksantogenat (PAKS) ishtirokida va uning ishtirokisiz vodorod peroksid (H_2O_2) bilan oksidlanishdan so'ng xalkozin va enargitning sirt xususiyatlari va flotatsiyasiga ta'siri o'rganildi. Ushbu tadqiqotda aralash va individual minerallarning flotatsiya sinovlari o'tkazildi. Vodorod peroksid bilan oksidlanish yordamida ishlov berish xalkozinlar va enargitlarning flotatsiyasiga salbiy ta'sir ko'rsatdi. PAKS adsorbsiyasi tahlili shuni ko'rsatadiki, enargit xalkozinga qaraganda PAKS ni tezroq adsorbsiya qiladi. Bundan tashqari, FTIR tahlili shuni ko'rsatadiki, PAKS xalkozin va enargit yuzalarida mis amilksantogenat shaklida adsorbsiyalangan. Shuningdek, diksantogen enargit yuzasida adsorbsiyalangan va xalkozin yuzasi enargit bilan solishtirganda ko'proq oksidlangan. Aralash mineralning flotatsiyasi shuni ko'rsatadiki, PAKS va H_2O_2 bilan ishlov berilgandan so'ng xalkozinning flotatsiyalanishi enargit bilan taqqoslaganda pasroq bo'lib chiqdi. Ushbu natija xalkozin va enargitni PAKS va H_2O_2 ni pH 9 da qayta ishlash orqali ajratish mumkin ekanligini ko'rsatadi.

Kalit so'zlar: xalkotsit, enargit, vodorod peroksid, kaliy amilksantogenat, flotatsiya

DOI: 10.34920/cce202346

Введение

Энаргит (Cu_3AsS_4) является одним из распространенных мышьяк содержащих мед-

ных минералов и обычно ассоциируется с сульфидными минералами меди, такими как халькопирит ($CuFeS_2$) и халькозин (Cu_2S) [1–

3]. В последние годы растет озабоченность по поводу переработки руд с низким содержанием сульфидов меди, содержащих энаргит. Неорганический мышьяк в энаргите представляет значительную опасность для окружающей среды и жизни человека [4–7]. Мышьяк канцерогенен и может вызывать острые и хронические отравления [8]. Кроме того, наличие мышьяка в медном концентрате снижает качество концентрата, увеличивает эксплуатационные и штрафные расходы на переработку этого концентрата, снижает электропроводность и плавление металлической меди [3, 9]. Ужесточение экологических норм по снижению выбросов мышьяка привело к снижению переработки медного концентрата, содержащего мышьяк [2, 10–21]. Однако в большинстве этих исследований изучалось разделение энаргита, теннантита ($Cu_{12}As_4S_{13}$) и первичных сульфидных минералов меди (т.е. халькопирита) с помощью флотации. Существует ограниченное количество исследований, посвященных разделению энаргита и вторичных сульфидных минералов меди, таких как халькозин, с помощью флотации. Поэтому важно понимать флотуемость смешанных минералов халькозина и энаргита для разделения этих минералов с помощью флотации.

Халькозин является основным сульфидным минералом меди в зонах оксидов и вторичных сульфидов медно-порфировых месторождений в Чили [22]. Халькозин составляет 30% от общего количества минералов меди в оксидной зоне. Кроме того, халькозин имеет содержание меди 79,8%, что значительно выше, чем у халькопирита с содержанием меди 34,6% [23]. Таким образом, извлечение халькозина может способствовать повышению качества медного концентрата. Однако Ли и соавторы [2] указывают на то, что халькозин был вторым по распространенности медным минералом после халькопирита в комплексной медной руде, содержащей энаргит из Китая. Кроме того, крупные предприятия по добыче меди в Чили, такие как рудник Коллахуаси (Тарапака, Чили) и рудник Министро Хейлс (Антофагаста, Чили), сообщили о халькозине и энаргите в качестве основных минералов меди [24]. К сожалению, халькозин и энаргит имеют схожие характеристики флотации. Оба минерала попадают в конечный медный концентрат в

обычных схемах флотации, что затрудняет их разделение.

Основная цель настоящего исследования – изучить влияние окислительной обработки с использованием H_2O_2 на флотуемость халькозина и энаргита в отсутствие и в присутствии амилксантогената калия (ПАКС) при pH 9. Флотуемость обоих минералов оценивали в одиночном и смешанном минеральной системе. Кроме того, было проведено исследование адсорбции ПАКС и характеристика поверхности с использованием инфракрасной спектроскопии с преобразованием Фурье для оценки влияния обработки ПАКС и окислительной обработки H_2O_2 на поверхность халькозина и энаргита.

Объекты и методы исследования

В этом исследовании использовались халькозин из шахты Леонард (Бьютт, Монтана, США) и энаргит из шахты Кирувилка (Сантьяго-де-Чуко, Ла-Либертад, Перу). Образец минерала измельчали, собирали вручную, сушили в сухом виде, а затем просеивали всухую для получения фракций разного размера. Фракция размером $-74 + 38$ мкм использовалась для флотационных испытаний и анализа с помощью УФ-видимой спектроскопии и анализа с помощью инфракрасной спектроскопии с преобразованием Фурье (FTIR). Рентгеновская дифракция (XRD, Ultima IV, Rigaku, Japan) каждого минерала представлена на рисунках 1 и 2, соответственно.

В качестве окислителя в этом исследовании использовали H_2O_2 аналитической чистоты (30% Wako Chemical Industries, Токио, Япония). Гидроксид калия (KOH) и соляная кислота (HCl) аналитической чистоты были приобретены у Wako Chemical Industries (Токио, Япония) и использовались в качестве модификаторов pH. Амилксантогенат калия промышленного качества (ПАКС), поставляемый Sumitomo Metal Mining Co., Ltd., использовали в качестве собирателя, а метилизобутилкарбинол аналитического качества (MIBC, Wako Chemical Industries, Токио, Япония) использовали в качестве пенообразователя.

Проведены флотационные испытания для оценки флотуемости халькозина и энаргита в моно- и смешанно-минеральных системах. Флотацию смеси халькозина и

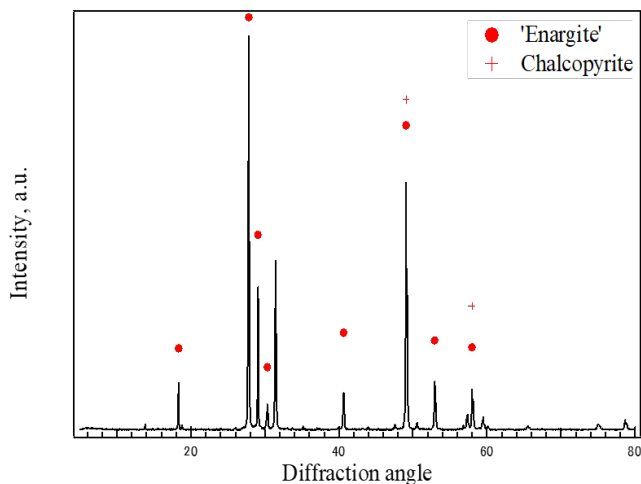


Рисунок 1. Рентгенограммы энаргита.

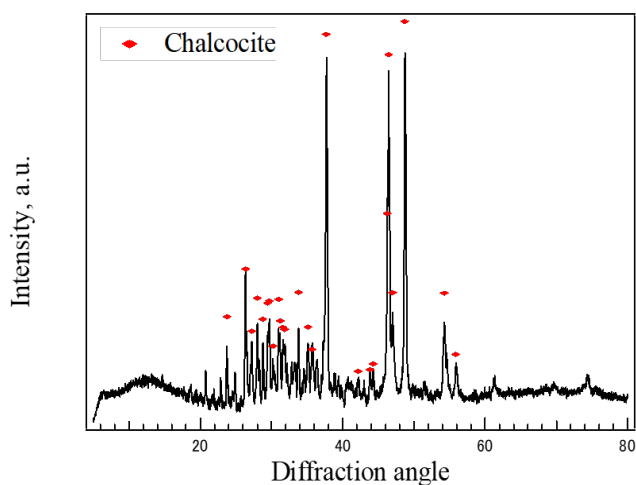


Рисунок 2. Рентгенограммы халькозина

энаргита проводили при соотношении 1:1. Минеральную суспензию готовили путем смешивания 0,6 г минерального порошка и 180 мл сверхчистой воды (Millipore®, Direct-Q, Merck, Япония). Суспензию довели до pH 9 в течение 2 мин. После этого суспензию обрабатывали с помощью ПАКС в течение 3 мин путем добавления исходного раствора ПАКС. Конечная концентрация ПАКС в растворе составляла 0,002 мМ. Затем проводили окислительную обработку в течение 60 мин добавлением различных концентраций H₂O₂ (0–10 мМ). После окислительной обработки в суспензию добавляли МИБС (50 ppm) и время кондиционирования составляло 1 мин. Суспензии контролировали на уровне pH 9 на протяжении всего процесса обработки. Флотационное испытание проводили с использованием стеклянной ячейки Партриджа и Смита и газообразного азота со скоростью потока 20 мл/мин [25, 26]. Пену собирали в течение 6 мин.

Адсорбция ПАКС на поверхности халькозина и энаргита была исследована с использованием анализа УФ-видимой спектроскопии и ИК спектроскопии (FTIR). Для адсорбционных исследований использовали минеральные порошки с размером фракции, прошедшей сито 38 мкм. Минеральные порошки (0,33 г) смешивали со 100 мл сверхчистой воды с получением минеральной суспензии с плотностью пульпы 0,33%. pH минеральной суспензии доводили до 9 в течение 2 мин. Затем добавляли ПАКС с конечной концентрацией 0,1 мМ для анализа УФ-видимой спектроскопии и 5 мМ для анализа FTIR. Причина использования более высокой концентрации ПАКС для образца для анализа FTIR заключается в улучшении интенсивности спектра. Обработку ПАКС проводили в течение 3 мин. Затем проводили окислительную обработку H₂O₂ с использованием различных концентраций (0–10 мМ) в течение 60 мин. pH суспензии контролировали на уровне 9 во время обработок окислением ПАКС и H₂O₂. Остаточную концентрацию ПАКС в водном растворе анализировали через определенный интервал времени (1–60 мин) с помощью УФ-видимого спектрофотометра (NanoPhotometer™ Pearl, Implen, Германия). Минеральную суспензию фильтровали, а затем сушили при температуре окружающей среды в течение 24 часов. Затем FTIR-спектр собирали с использованием ИК спектрометра с нарушенным полным отражением (ATR) (FT/IR-670 Plus, JASCO, Япония) с разрешением 16 см⁻¹.

Результаты и обсуждение

Флотация. Извлечение халькозина и энаргита в мономинеральной системе при различных концентрациях H₂O₂ в отсутствие и в присутствии 0,002 мМ при pH 9 представлено на рис. 3. В отсутствие ПАКС и H₂O₂ извлечение халькозина и энаргита составило 73% и 13% соответственно. Окислительная обработка различными концентрациями H₂O₂ в отсутствие ПАКС значительно снизило извлечение халькозина и постепенно снижался извлечение энаргита. Эти результаты показывают, что флотуемость халькозина более чувствительна к окислительной обработке по сравнению с энаргитом в отсутствие ПАКС. Этот результат флотации согласуется с предыдущим исследованием, показывающий, что халькозин

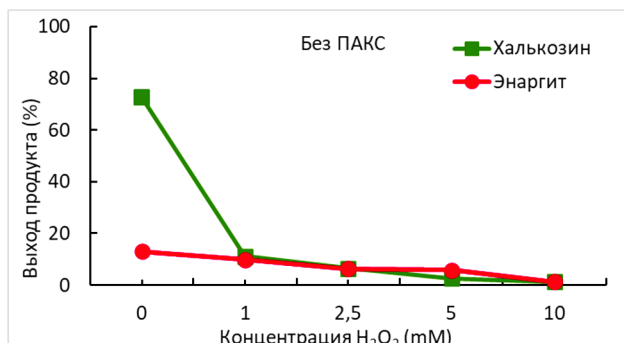


Рисунок 3. Извлечение халькозина и энаргита после обработки различными концентрациями водного раствора H₂O₂ в отсутствие ПАКС при pH 9.

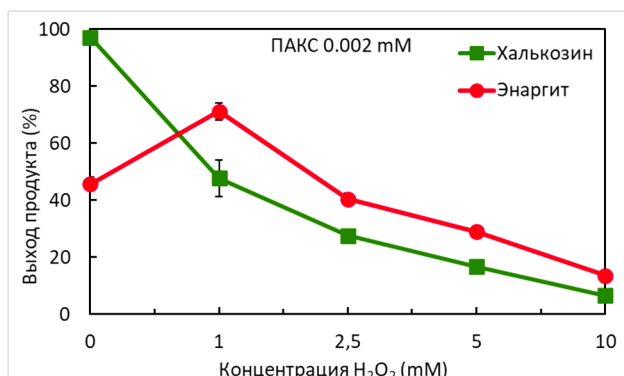


Рисунок 4. Извлечение халькозина и энаргита после обработки различными концентрациями водного раствора H₂O₂ в присутствии 0,002 мМ ПАКС при pH 9.

легче окисляется по сравнению с энаргитом [2].

Добавление 0,002 мМ ПАКС в отсутствие водного раствора H₂O₂ увеличивало извлечение халькозина и энаргита до 97% и 45% соответственно. Добавление 1 мМ водного раствора H₂O₂ улучшало извлечение энаргита до 71% в присутствии 0,002 мМ ПАКС. Однако извлечение халькозина значительно снизилось до 47% при аналогичных условиях. Окислительная обработка с использованием более высоких концентраций водного раствора H₂O₂ отрицательно сказывалась на извлечении обоих минералов. Об аналогичном явлении сообщалось о влиянии окислительной обработки на извлечение энаргита с использованием ПАКС [16]. Результаты флотации одного минерала, представленные на рис. 3 и 4, показывают, что может быть узкий промежуток для разделения халькозина и энаргита при использовании обработки ПАКС и H₂O₂. Для проверки этой гипотезы были проведены флотационные испытания смеси халькозина и энаргита. На рис. 5 показано влияние окислительной обработки H₂O₂

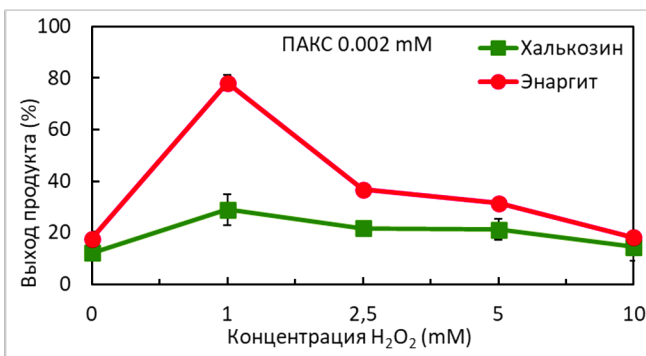


Рисунок 5. Извлечение смешанного халькозина и энаргита после обработки водным раствором H₂O₂ в присутствии 0,002 мМ ПАКС при pH 9.

на извлечение халькозина и энаргита в системе смешанных минералов в присутствии 0,002 мМ ПАКС при pH 9.

В отличие от извлечения халькозина и энаргита в системе с одним минералом, оба минерала имели низкую степень извлечения в присутствии 0,002 ПАКС и 0 мМ H₂O₂. Одной из возможных причин является недостаточная концентрация ПАКС. Затем был проведен тест на флотацию с использованием различных концентраций ПАКС, чтобы подтвердить этот аргумент. На рис. 6 показано, что извлечение халькозина и энаргита постепенно увеличивалось с увеличением концентрации ПАКС в отсутствие водного раствора пероксида водорода. Однако рис. 5 показывает, что извлечение энаргита значительно увеличивается после добавления 1 мМ водного раствора H₂O₂. При аналогичных условиях извлечение халькозина увеличилось с 13% до 27%.

Этот результат указывает на то, что концентрации ПАКС было достаточно для флотации халькозина и энаргита в системе смешанных минералов. Действительно, флотация отдельных минералов в присутствии 0,002 мМ

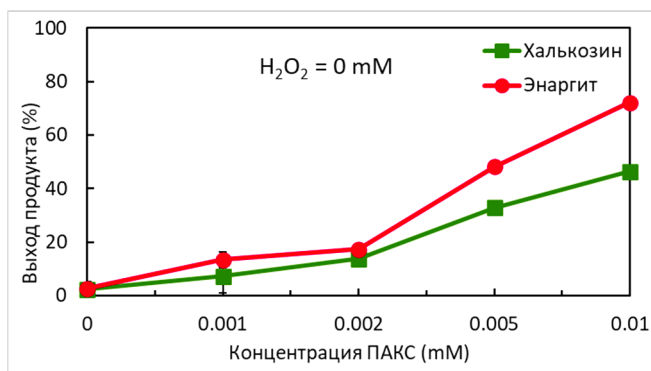


Рисунок 6. Влияние различных концентраций ПАКС в отсутствие водного раствора H₂O₂ на извлечение халькозина и энаргита в смешанной минеральной системе при pH 9.

ПАКС (рис. 3 и 4) подтверждает этот аргумент. Поэтому вполне вероятно, что взаимодействие обоих минералов в системе смешанных минералов может повлиять на поведение обоих минералов при адсорбции ПАКС. Однако этот аргумент требует дальнейшего изучения и будет рассмотрен в будущих исследованиях.

Добавление 2,5 мМ водного раствора H_2O_2 постепенно уменьшало извлечение халькозина и значительно уменьшало извлечение энаргита. Окислительная обработка более высокими концентрациями водного раствора H_2O_2 постепенно снижала извлечение обоих минералов. оптимальные условия для разделения энаргита и халькозина были достигнуты при использовании 0,002 мМ ПАКС и 1 мМ водного раствора H_2O_2 . Эффективность Ньютона составляла 50% при этих оптимальных условиях. Этот результат показывает, что разделение халькозина и энаргита возможно с использованием ПАКС и окислительной обработки H_2O_2 .

Адсорбционное исследование и ИК анализ. Спектры УФ-видимого поглощения 0,1 мМ водного раствора ПАКС при различных концентрациях H_2O_2 в отсутствие минеральных порошков представлены на рис. 7. Пик поглощения, расположенный при 301 и 226 нм, относится к иону амилксантогената (AX^- , $C_5H_{11}OCS_2^-$) [28, 29]. Окислительная обработка с использованием водного раствора H_2O_2 снижала оптическую плотность AX^- при 301 и 226 нм. Новые пики поглощения, расположенные при 348 и 206 нм, появлялись после добавления 10 мМ H_2O_2 в 0,1 мМ водный раствор ПАКС. Эти пики приписываются амилперксантогенат иону (APX^- , $C_5H_{11}OCS_2O^-$) и сероуглероду (CS_2) соответственно [30]. Появление этих новых пиков указывает на разложение AX^- при обработке H_2O_2 .

На рис. 8 показана остаточная концентрация ПАКС в водном растворе после испытания на адсорбцию с использованием халькозина и энаргита при pH 9. Следует отметить, что первые 3 мин на рис. 8 – это обработка ПАКС в отсутствие водного раствора H_2O_2 . Окислительную обработку 1 мМ водным раствором H_2O_2 начинали через 3 мин обработки ПАКС. На рис. 8 видно, что энаргит адсорбировав ПАКС быстрее, чем халькозин, в первую 1 мин. Оба минерала полностью адсорбировали

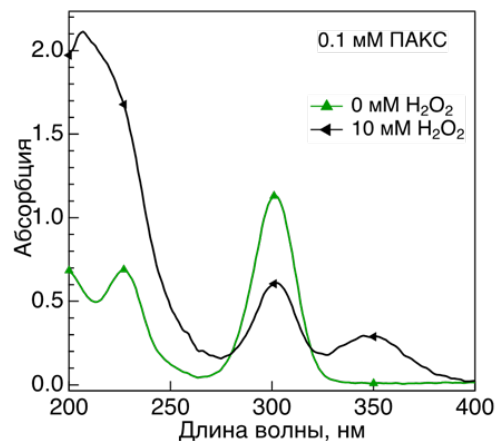


Рисунок 7. Влияние водного раствора H_2O_2 на оптическую плотность 0,1 мМ ПАКС в отсутствие халькозина и энаргита при pH 9.

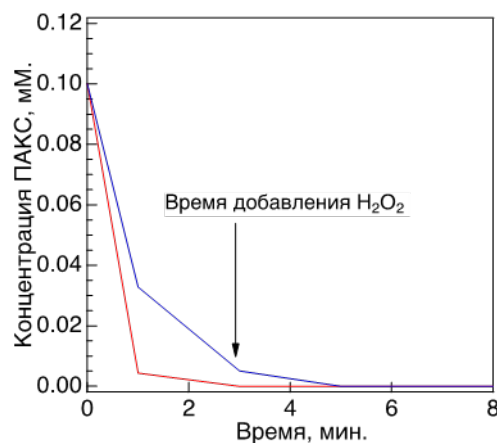


Рисунок 8. Остаточная концентрация ПАКС в водном растворе после теста на адсорбцию с использованием халькозина при pH 9 до и после добавления 1 мМ водного раствора H_2O_2 .

ПАКС через 3 мин, о чем свидетельствует отсутствие остаточного ПАКС в водном растворе. Из-за такой быстрой адсорбции ПАКС на поверхности минералов трудно оценить влияние обработки H_2O_2 на адсорбцию ПАКС на поверхностях халькозина и энаргита с помощью анализа УФ-видимой спектроскопии. Поэтому был проведен FTIR-анализ для оценки влияния окислительной обработки с использованием H_2O_2 на адсорбированный ПАКС.

На рис. 9 и 10 показаны ИК спектры халькозина и энаргита до и после обработки ПАКС и H_2O_2 . Кроме того, на рис. 9 и 10 представлены ИК спектры осадка амилксантогената меди ($C_5H_{11}OCS_2Cu$, $CuAX$) без и с промывкой ацетоном. $CuAX$ был получен смешиванием 0,1 М сульфата меди ($CuSO_4$) и 0,1 М ПАКС. Спектр $CuAX$ без промывки ацетоном показывает полосы отражения при 1029, 1141 и 1184 cm^{-1} , которые относятся к валентным колебани-

ям C=S, симметричным валентным колебаниям C-O-C и асимметричным валентным колебаниям C-O-C CuAX. соответственно [29–31].

Наличие диксантогена ((C₅H₁₁OCS₂)₂, (AX)₂) в результате диссоциации амилксантогената меди (Cu(C₅H₁₁OCS₂)₂, Cu(AX)₂) подтверждается наличием полосы отражения при 1261 см⁻¹, что приписывается асимметричным валентным колебаниям C-O-C (AX)₂ [29, 32, 33]. Полоса отражения при 1261 см⁻¹ исчезла в ИК-спектре CuAX, промытого ацетоном, что свидетельствует о физической адсорбции AX₂ на осадке CuAX.

Адсорбция ПАКС на поверхности халькозина и энаргита проявляется в появлении полос отражения при 1029, 1130 и 1184 см⁻¹, которые относятся к растяжению C=S, симметричному растяжению C-O-C и C-O. –C асимметричные валентные колебания CuAX соответственно. Признаков адсорбции диксантогена на поверхности халькозина нет (рис. 9). Однако диксантоген адсорбировался на поверхности энаргита, о чем свидетельствует полоса отражения при 1261 см⁻¹ (рис. 10).

Аналогичные ИК спектры халькозина были получены после обработки поверхности 5 мМ ПАКС и окислительной обработки 1 мМ водным раствором H₂O₂ (рис. 9).

Однако интенсивность полос отражения при 1029, 1130 и 1184 см⁻¹ несколько уве-

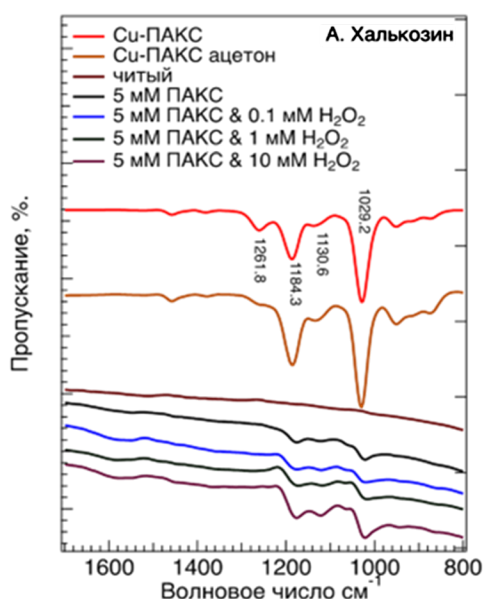


Рисунок 9. FTIR-спектры амилксантогената меди (CuAX), CuAX промытый ацетоном, халькозин до и после обработки 5 мМ ПАКС и водным раствором H₂O₂ различных концентраций при pH 9.

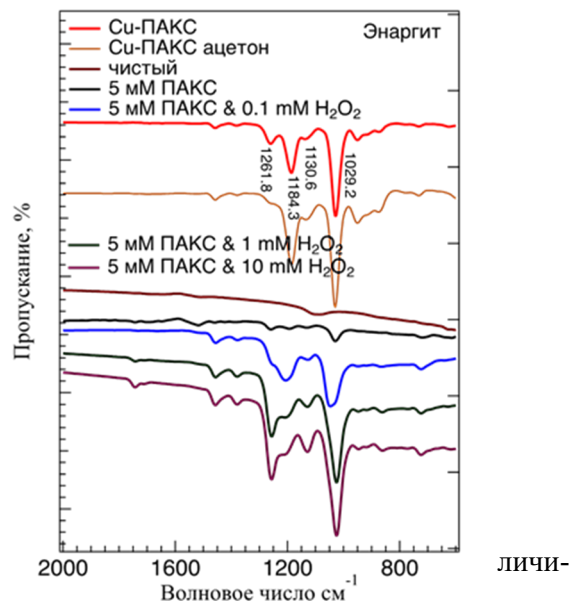


Рисунок 10. FTIR-спектры амилксантогената меди (CuAX), CuAX промытый ацетоном, энаргит до и после обработки 5 мМ ПАКС и водным раствором H₂O₂ различных концентраций при pH 9.

лась после окислительной обработки 10 мМ водным раствором H₂O₂, что свидетельствует об увеличении адсорбции ПАКС на поверхности халькозина. С другой стороны, адсорбция CuAX и AX₂ на поверхности энаргита значительно возросла после окислительной обработки различными концентрациями водного раствора H₂O₂, на что указывает увеличение интенсивности полос при 1029, 1130, 1184 и 1261 см⁻¹ на фиг. 10. При сравнении рис. 9 и 10 видно, что окислительная обработка водным раствором H₂O₂ увеличивает адсорбцию ПАКС на поверхности энаргита по сравнению с адсорбцией на халькозине.

Заключение

В работе представлено влияние окислительной обработки водным раствором H₂O₂ на поверхностные свойства и плавучесть халькозина и энаргита как в отсутствие, так и в присутствии ПАКС при pH 9. Флотационные испытания одного минерала показали, что обработка окислением H₂O₂ обычно оказывает отрицательное влияние на плавучесть халькозина и энаргита как в отсутствие, так и в присутствии ПАКС. Образование частиц Cu(II) в виде Cu(OH)₂ и сульфатных форм на поверхности халькозина и энаргита является основной причиной угнетающего эффекта окислительной обработки H₂O₂. Кроме того, после окислительной обработки H₂O₂ на поверхности энаргита

образовались оксиды мышьяка (As_2O_3 и As_2O_5).

Установлено, что флотация энаргита увеличивается после окислительной обработки H_2O_2 в низкой концентрации в присутствии ПАКС, при которой плавучесть халькозина остается низкой. Флотация смешанных минералов подтвердила это явление и указала на узкое окно для разделения халькозина и энаргита с использованием 0,002 мМ ПАКС и 1 мМ водного раствора H_2O_2 . Результаты исследования адсорбции ПАКС, FTIR анализа

показывают, что разделение халькозина и энаргита может быть вызвано быстрой адсорбцией ПАКС на поверхности энаргита по сравнению с адсорбцией на халькозине, а также адсорбцией диксантогена $((AX)_2)$ на энаргите. Поверхности в дополнение к амилксантогенату меди ($CuAX$), а также долю этих адсорбированных ПАКС (т.е. $CuAX$ и $(AX)_2$) и полисульфида по сравнению с окисленными частицами (т.е. $Cu(II)$ и сульфатными видами) на поверхности халькозин и энаргит.

REFERENCES

- Filippou D., St-Germain P., Grammatikopoulos T. Recovery of Metal Values from Copper—Arsenic Minerals and Other Related Resources. *Miner Process Extr Metall Rev.*, 2007, 28, 247–298. DOI: 10.1080/08827500601013009
- Li T., Zhang Y., Zhang B., Jiao F., Qin W. Flotation separation of enargite from complex copper concentrates by selective surface oxidation. *Physicochem Probl Miner Process*, 2019, 55, 852–864.
- Plackowski C., Nguyen A.V., Bruckard W.J. A critical review of surface properties and selective flotation of enargite in sulphide systems. *Miner Eng.*, 2012, 30, 1–11. DOI: 10.1016/j.mineng.2012.01.014
- Roy Chowdhury T. Arsenic in ground water in six districts of West Bengal, India: the biggest arsenic calamity in the world. Part I. Arsenic species in drinking water and urine of the affected people. *Analyst*, 1995, 120, 643–650.
- Figoli A/, Fuoco I/, Apollaro C/, Chabane M/, Mancuso R/, Gabriele B/, et al. Arsenic-contaminated groundwaters remediation by nanofiltration. *Sep. Purif. Technol.*, 2020, 238, 116461.
- Mandal B.K., Suzuki K.T. Arsenic round the world: a review. *Talanta*, 2002, 58, 201–235.
- Petrus H.T., Hirajima T., Sasaki K., Okamoto H. Effects of sodium thiosulphate on chalcopyrite and tennantite: An insight for alternative separation technique. *Int. J. Miner. Process*, 2012, 102, 116–123.
- Arsenica Review. Part I: Occurrence, Toxicity, Speciation, Mobility - Bissen - 2003 - Acta hydrochimica et hydrobiologica - Wiley Online Library n.d. <https://onlinelibrary.wiley.com/doi/abs/10.1002/ahch.200390025> (accessed September 5, 2023).
- Biswas A.K., Daventport W.G. Extractive Metallurgy of Copper. Tarrytown, N.Y., U.S.A.: Pergamon, 1994. 500.
- Castro S.H., Honores S. Surface properties and floatability of enargite. *Proc. XX Int. Miner. Process. Congr. IMPCP*, Rome, Italy, 2000, 8, 47–53.
- Fornasiero D., Fullston D., Li C., Ralston J. Separation of enargite and tennantite from non-arsenic copper sulfide minerals by selective oxidation or dissolution. *Int. J. Miner. Process*, 2001, 61, 9–19.
- Guo H., Yen W-T. Selective flotation of enargite from chalcopyrite by electrochemical control. *Miner Eng.*, 2005, 18, 605–612.
- Haga K., Tongamp W., Shibayama A. Investigation of flotation parameters for copper recovery from enargite and chalcopyrite mixed ore. *Mater Trans.*, 2012, 53, 707–715.
- Senior G.D., Guy P.J., Bruckard W.J. The selective flotation of enargite from other copper minerals—a single mineral study in relation to beneficiation of the Tampakan deposit in the Philippines. *Int. J. Miner. Process*, 2006, 81, 15–26.
- Suyantara G.P.W., Hirajima T., Miki H., Sasaki K., Kuroiwa S., Aoki Y. Effect of Na_2SO_3 on the floatability of chalcopyrite and enargite. *Miner Eng.*, 2021, 173, 107222. DOI: 10.1016/j.mineng.2021.107222.
- Suyantara G.P.W., Hirajima T., Miki H., Sasaki K., Kuroiwa S., Aoki Y. Effect of H_2O_2 and potassium amyl xanthate on separation of enargite and tennantite from chalcopyrite and bornite using flotation. *Miner Eng.*, DOI: 10.34920/cce202335 2020, 152, 106371.
- Yen W.T., Tajadod J. Selective flotation of enargite and chalcopyrite. *Proc. XX Int. Miner. Process. Conf. Massacci Ed Rome, Italy, 2000*, 8, 49–55.
- Tayebi-Khorami M., Manlapig E., Forbes E., Bradshaw D., Edraki M. Selective flotation of enargite from copper sulphides in Tampakan deposit. *Miner Eng.*, 2017, 112, 1–10.
- Petrus H.T., Hirajima T., Sasaki K., Okamoto H. Separation mechanism of tennantite and chalcopyrite with flotation after oxidation using oxygen. *27th Int. Miner. Process. Congr. IMPC*, Santiago, Chile, 2014.
- Sasaki K., Takatsugi K., Ishikura K., Hirajima T. Spectroscopic study on oxidative dissolution of chalcopyrite, enargite and tennantite at different pH values. *Hydrometallurgy*, 2010, 100, 144–151.
- Petrus H.T., Hirajima T., Sasaki K., Okamoto H. Effect of pH and diethyl dithiophosphate (DTP) treatment on chalcopyrite and tennantite surfaces observed using atomic force microscopy (AFM). *Colloids Surf. Physicochem. Eng. Asp.*, 2011, 389, 266–273.
- Tanaka Y., Miki H., Suyantara G.P.W., Aoki Y., Hirajima T. Mineralogical Prediction on the Flotation Behavior of Copper and Molybdenum Minerals from Blended Cu–Mo Ores in Seawater. *Minerals*, 2021, 11/8, 869. DOI: 10.3390/min11080869
- Bulatovic S.M. Handbook of flotation reagents: chemistry, theory and practice: Volume 1: flotation of sulfide ores. Elsevier; 2007. 458.
- Singer D.A., Berger V.L., Moring B.C. Porphyry copper deposits of the world: Database and grade and tonnage models, U.S. Geological Survey, Reston, Virginia, 2008. 45.
- Suyantara G.P.W., Hirajima T., Miki H., Sasaki K. Floatability of molybdenite and chalcopyrite in artificial seawater. *Miner Eng.*, 2018, 115, 117–130.
- Suyantara G.P.W., Hirajima T., Miki H., Sasaki K. Bubble interactions with chalcopyrite and molybdenite surfaces in seawater. *Miner Eng.*, 2020, 157, 106536.
- Fullston D., Fornasiero D., Ralston J. Zeta potential study of the oxidation of copper sulfide minerals. *Colloids Surf. Physicochem. Eng. Asp.*, 1999, 146, 113–121.
- Han C., Wei D., Gao S., Zai Q., Shen Y., Liu W. Adsorption and desorption of butyl xanthate on chalcopyrite. *J. Mater. Res. Technol.*, 2020, 9, 12654–12660.
- Mustafa S., Hamid A., Naeem A. Xanthate adsorption studies on chalcopyrite ore. *Int. J. Miner. Process*, 2004, 74, 317–325.
- Leppinen J.O., Basilio C.I., Yoon R.H. In-situ FTIR study of ethyl xanthate adsorption on sulfide minerals under conditions of controlled potential. *Int. J. Miner. Process*, 1989, 26, 259–274.
- Mielczarski J., Leppinen J. Infrared reflection-absorption spectroscopic study of adsorption of xanthates on copper. *Surf. Sci.*, 1987, 187, 526–538.
- Khmeleva T.N., Chapelet J.K., Skinner W.M., Beattie D.A. Depression mechanisms of sodium bisulphite in the xanthate-induced flotation of copper activated sphalerite. *Int. J. Miner. Process*, 2006, 79, 61–75.
- Zhang Y., Cao Z., Cao Y., Sun C. FTIR studies of xanthate adsorption on chalcopyrite, pentlandite and pyrite surfaces. *J. Mol. Struct.*, 2013, 1048, 434–440.
- Anisimov V.V., Saprykin A.V., Artemkina I.M., Makarov N.A. Vliyaniye anionnogo sostava iskhodnykh solej na polucheniye ortostannata cinka zol'-gel' metodom [Influence of the anionic composition of the initial salts on the production of zinc orthostannate by the sol-gel method]. *Steklo i keramika*, 2021, 4, 20–25.