

MINERALOGICAL CHARACTERISTICS OF GOLD IN TECHNOLOGICAL PRODUCTS OF PORPHYRY COPPER ORE BENEFICIATION

Nikolay Nestorov, Mihail Petrov, Teodora Yankova, Irena Grigorova

University of Mining and Geology “St. Ivan Rilski”, 1700 Sofia; E-mail: n.nestorov@mgu.bg

ABSTRACT. The paper presents the results of a mineralogical study of gold in beneficiation products obtained from porphyry copper ores. XRD, reflected-light optical microscopy, SEM, and EDX were used for sample characterisation. The results show that gold occurs in native form and is predominantly liberated, with particle sizes ranging from 10x20 to 250x150 µm and gold contents varying from 57.65 to 97.75%. Variations in the Ag distribution within some gold particles were identified, including the occurrence of electrum (Au, Ag), alongside particles with a uniform gold composition. Although gold is relatively well liberated, most particles contain microinclusions of quartz, pyrite, and chalcopyrite, which may adversely affect flotation recovery. The results confirm that a reliable assessment of the technological behaviour of gold requires comprehensive mineralogical investigations combined with chemical analyses.

Key words: porphyry copper ores, gold, mineralogy, flotation.

МИНЕРАЛОЖКА ХАРАКТЕРИСТИКА НА ЗЛАТОТО В ТЕХНОЛОГИЧНИ ПРОДУКТИ ОТ ОБОГАТЯВАНЕ НА МЕДНОПОРФИРНИ РУДИ

Николай Несторов, Михаил Петров, Теодора Янкова, Ирена Григорова

Минно-геоложки университет „Св. Иван Рилски“, 1700 София

РЕЗЮМЕ. Представени са резултатите от минераложки изследвания на златото в технологични продукти от обогатителна фабрика, преработваща меднопорфирни руди. Използвани са XRD, оптична микроскопия в отразена светлина, SEM и EDX. Златото присъства в самороден вид и е освободено, с размери на частиците от 10 x 20 до 250 x 150 µm и съдържание 57,65 до 97,75% Au. Установено е наличие на нееднородност и вариации в разпределението на Ag в някои златни частици, включително наличие на електрум (Au, Ag), както и присъствие на частици от еднородно злато. Въпреки свободната им форма, в повечето частици са регистрирани микровключения от кварц, пирит и халкопирит, които могат да затруднят флотационното извличане. Резултатите потвърждават, че за надеждна оценка на технологичното поведение на златото е необходимо извършването на комплексни минераложки изследвания и химични анализи.

Ключови думи: меднопорфирни руди, злато, минералогия, флотация.

Въведение

Технологичните схеми за преработка на меднопорфирни руди и ефективното извличане на златото, изискват провеждането на комплексни минераложки изследвания. Съществено значение за правилната интерпретация на технологичното поведение на златото имат химичният състав, морфоложките особености, размерът на златните частици и степента на тяхната освободеност, както и минералните асоциации.

Именно тези характеристики в значителна степен определят условията за извличане на златото при флотационно обогатяване (Agorhom et al., 2013; Allan and Woodcock, 2001).

Томова и Кисъов (2025) посочват, че някои геофизични методи като електрическата томография (ERT) могат успешно да се използват за литолошко диференциране на подповърхностната среда при задачи, свързани с меднопорфирни находища. Методът позволява разграничаване на зони с различен литоложки и структурен характер въз основа на пространственото разпределение на специфичното електрическо съпротивление - физичен параметър, чувствителен към литологията, порьозността и водното съдържание (Tomova and Kisyov, 2025).

Agorhom, Skinner и Zanin (2013) показват, че минералогията на златото оказва пряко влияние върху неговото флотационно поведение и че оптимизирането на извличането му от меднопорфирни руди, изисква съчетаването на флотационни изследвания с минераложки методи.

Allan and Woodcock (2001) отбелязват, че минераложката характеристика на златото е необходима предпоставка за оценка на възможностите за неговото извличане, тъй като поведението на самородното злато и електрума зависи от размера, формата, химичния състав и наличието на срastъци.

Сред методите за минераложка характеристика на златото в рудите и технологичните продукти, особено значение имат оптичната микроскопия в отразена светлина, рентгеновата дифракция, сканиращата електронна микроскопия (SEM) и енергийно-дисперсионният рентгенов анализ (EDX). Чрез тях могат да се определят минералните фази, типовете срastъци, морфологията на златните частици, локалният им химичен състав и наличието на микровключения.

Blannin et al. (2021) посочват, че SEM-базираната автоматизирана минералогия е един от основните методи на геометалургичните изследвания, като същевременно подчертават необходимостта от внимателна интерпретация на количествените минераложки резултати.

В предишна публикация (Несторов и др., 2026) акцентът беше поставен върху химико-технологичната оценка на съдържанието и разпределението на медта и златото в технологичните продукти от досмилане и пречистна флотация. Настоящата работа е насочена към минераложката характеристика на златото. Целта е да се установят формата на присъствие, морфологията, химичният състав, фазовата еднородност и степента на либерализация (освобождаване) на златните частици в ключови технологични продукти, както и да се оцени

тяхното значение за технологичното поведение на златото при обогатяване на меднопорфирни руди.

Материали и методика

Обектът на изследване, схемата на опробване, пробовземането и пробоподготовката са описани подробно в предходна публикация (Несторов и др., 2026). Настоящото изследване обхваща десет технологични продукта от цикъла на досмилане и пречистна флотация на обогатителна фабрика, преработваща меднопорфирни руди, опробвани в четири последователни серии.

За целите на настоящата работа са приложени минераложки методи, насочени към определяне на минералния състав на продуктите, формата на присъствие на златото, неговата морфология, химичен състав, срастъци и степен на освобождаване.

Минералният състав на продуктите е определен чрез рентгенова дифракция (XRD). Анализирани са продуктите П5, П6, П7, П8, П9 и П10 от трите серии на опробване, тъй като те представят междинни и крайни продукти от пречистна флотация и позволяват проследяване на измененията в минералния състав в хода на технологичния процес.

За минераложка характеристика на рудните минерали и златото е приложен подход, включващ предварително гравитационно набогатяване на технологичните продукти за получаване на гравитационен концентрат (шлихова проба), в който златните частици са подбирани под бинокулярен стереомикроскоп. Паралелно с това са изготвени аншлифи -полирани препарати- брикети с диаметър 20 mm, получени от споени със смола минерални частици, като от всеки продукт са изработени по четири броя. Микроскопските изследвания на аншлифите в отразена светлина са проведени, с цел определяне на минералните фази, структурно-текстурните особености и типовете срастъци. Минераложките изследвания са допълнени с шлихов анализ, чрез който е създадена възможност за наблюдение и подбор на отделни златни частици за последващи SEM/EDX изследвания.

SEM/EDX анализите са извършени върху шлихови проби и върху полираните препарати-брикети. При изучаването на аншлифите, изследванията са направени в режим обратно разсеяни електрони (COMPO), при който изображението отразява фазовата нееднородност на минералните зърна. При шлиховите проби изследванията са проведени в режим вторични електрони (SEI), който дава информация за повърхностната морфология (релефа) на частиците. Чрез EDX анализ е определян локалният химичен състав на отделни златни частици и на минералните включения в тях. За всички наблюдавани златни частици са изготвени рентгенови разпределения на елементите по площ (X-ray mapping), както и смесени елементни карти, представящи разпределението на всички елементи в изследваната площ. В отделни случаи е използван и анализ по линия за проследяване на промените в състава през различни участъци на частиците.

Целта на SEM/EDX изследванията е да се охарактеризират отделните минерали, срастъци и микровключения от злато и други полезни компоненти, тяхната принадлежност към отделни минерали или към свободно състояние, както и формата, размерите и

фазовата нееднородност на частиците. Този подход позволява съчетаване на минераложко описание с локален химичен анализ и е особено подходящ за интерпретация на технологичното поведение на златото в продуктите от досмилане и пречистна флотация.

Резултати и дискусия

Минерален състав на технологичните продукти (XRD)

Резултатите от рентгенодифракционния анализ, извършен на продуктите П5, П6, П7, П8, П9 и П10 при трите серии на опробване са представени в Таблица 1. Установени са следните минерални фази: халкопирит, пирит, кварц, албит, микроклин, клинохлор и мусковит, а в отделни серии – молибденит и каолинит.

Таблица 1. Минерален състав на технологичните продукти по данни от XRD анализ (%)

Продукт	№	Халкопирит	Пирит	Кварц	Албит	Микроклин	Клинохлор	Мусковит	Молибденит	Каолин
П5	1	25	21	11	16	24	3	–	–	–
	2	40	15	10	10	14	–	8	–	–
	3	36	33	5	7	17	–	–	2	–
П6	1	5	20	19	2	29	6	–	–	–
	2	6	6	18	18	31	5	15	–	–
	3	8	10	28	17	36	–	–	–	–
П7	1	5	26	18	21	24	5	–	–	–
	2	8	7	19	14	22	16	10	2	2
	3	3	5	31	20	35	5	–	–	–
П8	1	5	37	13	18	27	–	–	–	–
	2	6	7	20	17	29	7	13	–	–
	3	8	53	7	11	18	–	–	–	–
П10	1	69	10	7	–	14	–	–	–	–
	2	52	15	9	8	11	4	–	–	–
	3	67	11	5	6	9	–	–	1	–
П9	1	84	8	2	–	6	–	–	–	–
	2	79	5	5	–	10	–	–	–	–
	3	80	6	3	4	6	–	–	–	–

Съдържанието на халкопирит нараства отчетливо от междинните продукти към крайните пенни продукти. В продуктите П6 и П7 халкопиритът е застъпен в интервала 3-8%, докато в П9 достига 79-84%, а в П10 – 52-69%. Обратна тенденция се наблюдава при скалообразуващите минерали (кварц, албит, микроклин), чийто сумарен дял намалява от П6 и П7 към П9 и П10. Пиритът е с по-високо съдържание в П5 и П8, докато в крайните пенни продукти неговият дял е значително по-нисък. В отделни серии са установени и молибденит, мусковит и каолинит, но в подчинени количества.

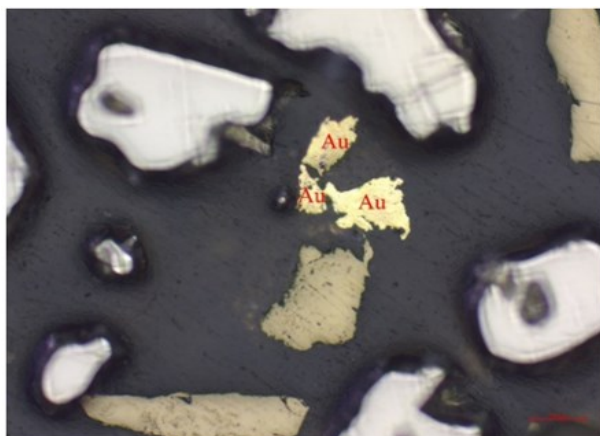
Установените различия могат да бъдат обяснени с хетерогенния характер на изследвания масив и пространствената променливост на неговите физични свойства. Подобни зависимости са отчетени и от Grigorova (2020), която показва, че вариациите в литоложкия състав и свързаните с тях физико-механични характеристики водят до значителни различия в поведението на материала при добив и последваща преработка.

Рудни минерални фази и срастъци

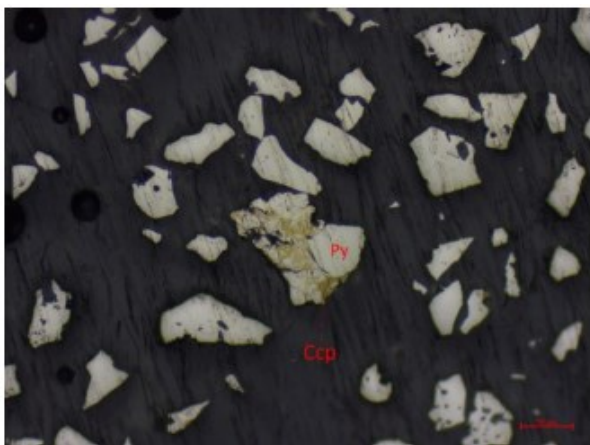
Оптичната микроскопия в отразена светлина, проведена на полирани препарати-брикети от продуктите ПЗ, П1 и П4, показва присъствие на пирит, халкопирит, борнит, магнетит/мартит, ковелин, галенит, медни сулфосоли от групата тетраедрит–тенантит, сфалерит и арсенопирит. В продуктите ПЗ и П1 е установено и наличие на самородно злато (фиг. 1).

Наблюдаваните видове срастъци включват халкопирит с кварц, пирит с магнетит, пирит с халкопирит ± галенит (фиг. 2), халкопирит с борнит, ковелин с борнит и халкопирит, медни сулфосоли с кварц и халкопирит, както и пирит със злато в продукта П1.

В продукт П4 самородно злато не е установено, а рудните минерали са представени главно от пирит, халкопирит, хематит, магнетит/мартит, ковелин, галенит, медни сулфосоли и сфалерит.



Фиг. 1. Свободни частици от злато – в централната част на кадъра. Около тях – свободни частици пирит (бяло) и халкопирит (жълто). Отразена светлина, N II, маркер 50 μm



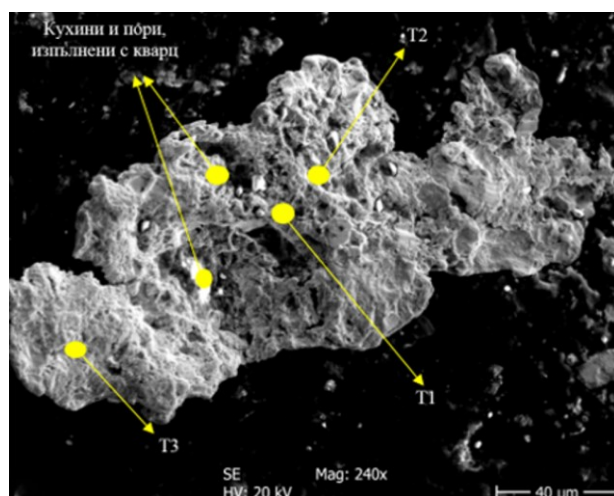
Фиг. 2. Срастък на пирит (бяло) с халкопирит (жълто) – в централната част на кадъра. Около него – свободни частици пирит. Отразена светлина, N II, маркер 50 μm

Морфология и размери на златните частици

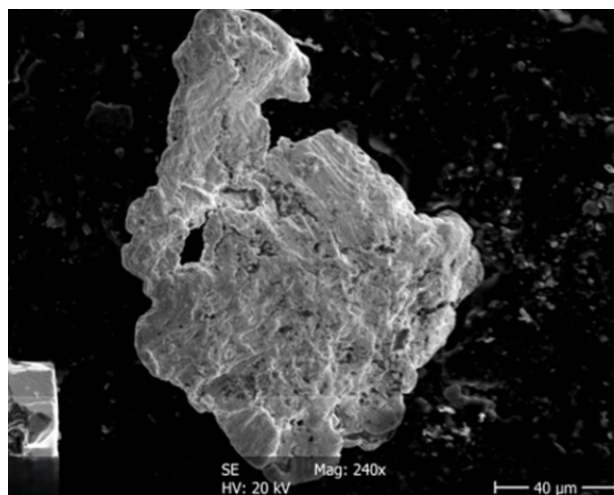
Изследваните златни частици, установени в шлиховите проби и полираните препарати-брикети от продуктите ПЗ и П1, попадат в групите на много дребно (50-100 μm) и дребно (100-250 μm) злато, съгласно класификацията на Петровская (1973). Установени са частици с размери от 10 x 20 μm до 250 x 150 μm .

Формите на златните частици са предимно неправилни, разклонени и удължени, с неравни резки контури. Част от частиците показват заоблени форми, вероятно свързани с известно въздействие при смилането на рудата. Повърхността на златинките е предимно пореста, с множество микрокухини, пори и пукнатини. Наблюдават се отпечатащи от отронени минерални зърна от кварц, пирит и халкопирит. По повърхността на една част от частиците са установени и налепи от фина прахообразна нерудна и рудна маса, включена механично при смилането на рудата.

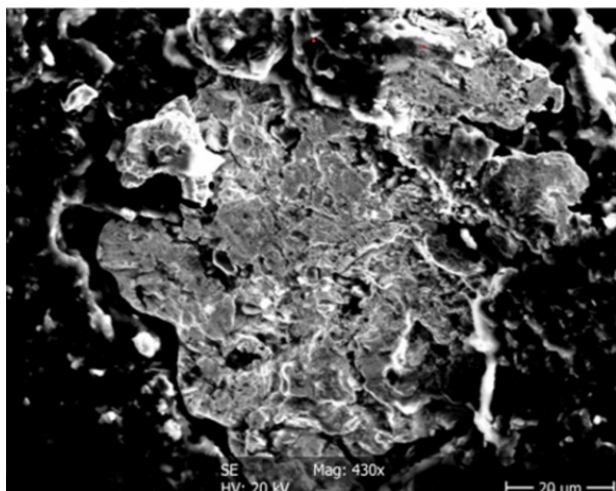
Всички регистрирани златни частици са освободени, т.е. не са установени срастъци с други минерали. Въпреки това, в повечето частици са регистрирани микровключения от кварц, пирит и халкопирит, отложени в кухини, пукнатини и пори на златинките, което може да затрудни тяхното флотационно извличане (фиг. 3, фиг. 5 и фиг. 10).



Фиг. 3. Пореста златинка със слаби механични деформации (ПЗ, 7). В микрокухини и пори сред нея е отложен кварц. SEI, SEM, 240 X



Фиг. 4. Пореста златинка със слабо изразени заоблени очертания (ПЗ, 9), SEI, SEM, 240 X



Фиг. 5. Раздробена златинка (сиво), с ъгловато включение от халкопирит (бяло до сиво) в горния ляв ъгъл. SEI, SEM, 430 X

Химичен състав и еднородност на златните частици (SEM/EDX)

С помощта на EDX анализи е определен химичният състав в различни части на златните частици (център и периферия), за изучаване фазовата еднородност на златинките. Определен е и минералния състав на микровключенията, присъстващи сред златните частици.

Обобщените данни за химизма на изследваните частици са представени в Таблица 2.

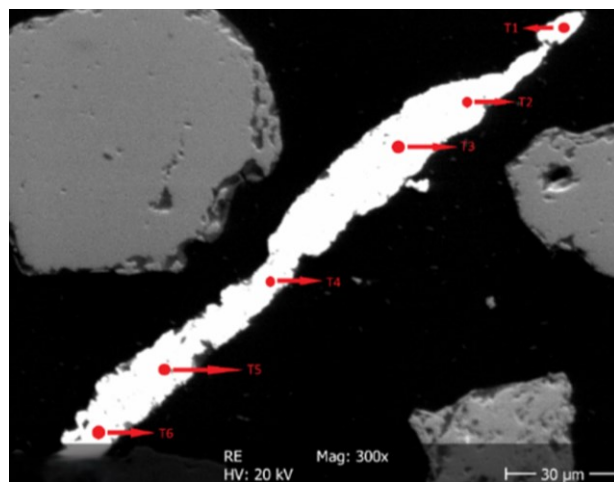
Таблица 2. Обобщени данни за химичния състав на изследваните златни частици (SEM/EDX)

№	Продукт	Размери, µm	Au център, %	Ag център, %	Au периф., %	Ag периф., %	Включения
1	ПЗ	120×15	92,16	7,36	57,65	40,27	Py, Qtz
2	ПЗ	18×18	88,80	9,97	88,16	9,44	Py
3	ПЗ	80×40	89,59	9,69	92,33	6,39	Ccp
4	ПЗ	50×60	86,41	12,54	84,41	12,97	Qtz
5	П1	10×20	90,66	8,47	77,23	20,39	Ccp
6	ПЗ	10×30	97,75	1,35	93,17	5,60	–
7	ПЗ	250×150	80,11	16,68	79,33	16,79	Qtz, Py
8	ПЗ	120×90	85,30	13,25	79,11	11,54	Ccp
9	ПЗ	200×150	93,63	5,52	87,97	10,97	Qtz, Fe-окс.
10	ПЗ	–	82,77	7,76	84,62	9,14	Ccp, Qtz, Py
11	ПЗ	200×90	91,38	6,32	79,58	17,56	Qtz
12	ПЗ	–	93,84	3,65	93,04	5,10	Qtz
13	ПЗ	200×200	82,16	15,35	85,97	12,64	Qtz, Py

Py - пирит, Ccp - халкопирит, Qtz - кварц, Fe-окс. - железни оксиди.

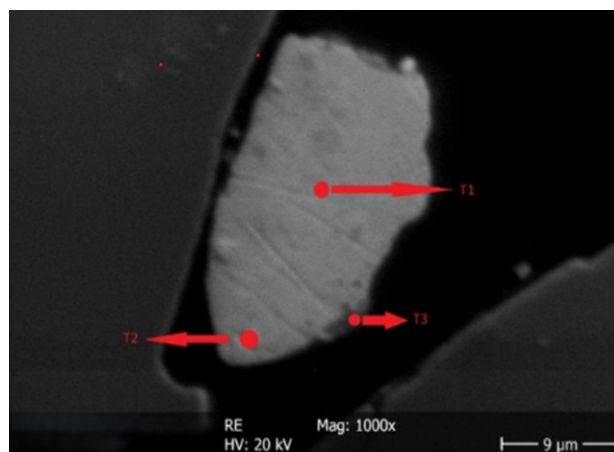
Съдържанието на Au в различни участъци на анализирани златинки варира в широки граници – от 57,65 до 97,75%, а съдържанието на Ag варира в интервала 1,35 - 40,27%, като в повечето случаи е под 10-16% Ag.

EDX анализите показват неравномерно разпределение на среброто в площта на някои от златните частици, както и наличие на еднородни частици с относително равномерно разпределение на среброто. Например при частица от продукт ПЗ.1 (фиг. 6) с размери 120 × 15 µm, съдържанието на Au в централната част достига до 92,16% (високопробно злато), докато в периферията на същата златинка намалява до 57,65% като съответно съдържанието на Ag нараства до над 40,27%, което показва състав, характерен за електрум (Au, Ag).



Фиг. 6. Напречен пререз на златна частица (бяло) (ПЗ, 1), с отбелязани местата на проведените анализи. Около нея – свободни частици от пирит (сиво), SEM, 300 X.

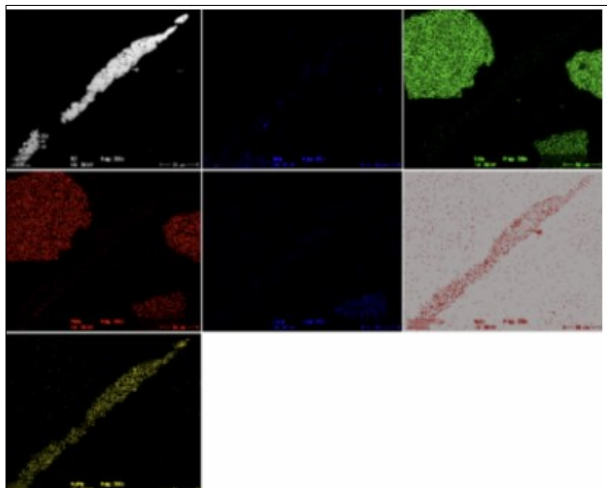
Подобна вътрешна нееднородност и наличие на зоналност се установява и в златинка от технологичния продукт П1.5 (фиг. 7), в която съдържанието на Au намалява от центъра към периферията при едновременно повишаване съдържанието на Ag и преход от високопробно злато към електрум (Au,Ag).



Фиг. 7. Златна частица (сиво)(П1, 5), с включение от халкопирит (черно), в периферията на златинката. SEM, 1000 X

За друга частица от продукта ПЗ с размери 18 × 18 µm е установено почти постоянно съдържание на Ag в интервала 9,97–9,44%, характерно за високопробното злато.

Площното разпределение на елементите (x-ray mapping) в златна частица ПЗ.1 е представено на фиг. 8. На същата фигура е показано и разпределението на елементите в свободни частици от пирит, асоцииращи със златинката.

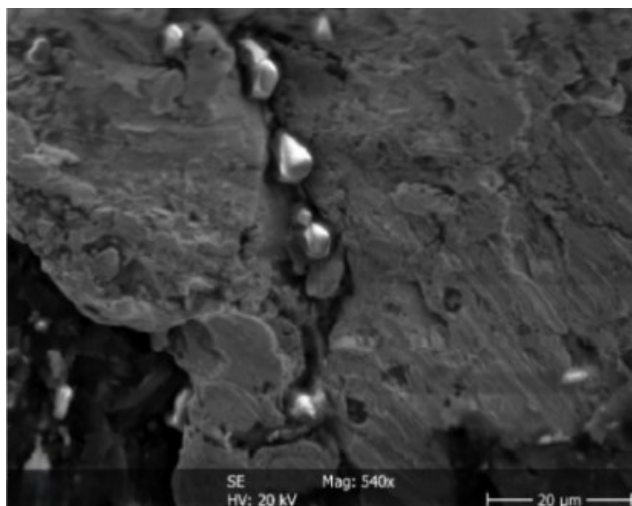


Фиг. 8. Площно разпространение на елементите Si (синьо), S (зелено), Fe (червено), Cu (светло синьо), Ag (светло червено), Au (жълто), SEM, 300 X

На смесените елементни карти отчетливо се наблюдава наличието на микровключения от кварц, пирит и други минерални фази, отложени в кухини, празнини и пори, в някои от изследваните златни частици (фиг. 10).

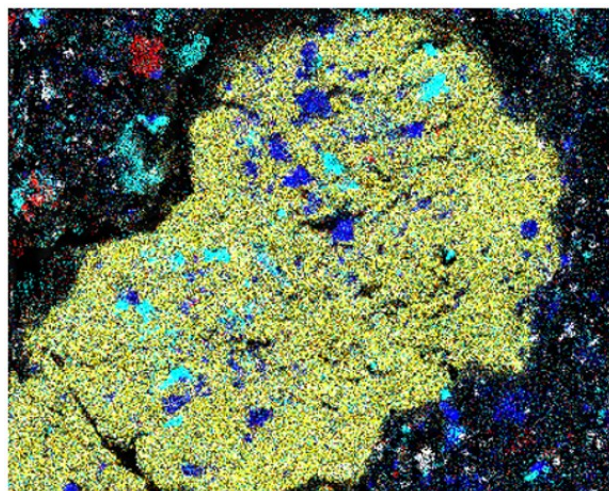
Технологична интерпретация на флотиремостта на златните частици

Въз основа на минераложките наблюдения и SEM/EDX данните могат да се разграничат два основни типа златни частици по отношение на очакваното им флотационно поведение. Първият тип включва частици с относително чиста повърхност, високо съдържание на Au и ограничен брой микровключения, при които са налице благоприятни условия за флотация (фиг. 9).



Фиг. 9. Златна частица от продукт ПЗ с високо съдържание на Au и микровключения от заоблени кварцови зърна, разположени по пукнатина в златинката, SEI, SEM, 540 X

Вторият тип обхваща частици с пореста повърхност, кухини и пукнатини, запълнени с кварц, пирит и халкопирит, както и частици с повърхностни налепи от фина рудна и нерудна маса. При тях условията за флотационно извличане са по-неблагоприятни и е възможно част от тези частици да преминават в отпадъчния продукт (фиг. 10).



Фиг. 10. Нехомогенна златинка (жълто), с множество микрокухини и пори, запълнени с кварц (тъмносиньо) и пирит (светлосиньо), SEM, 270 X

Наличието на механично включени повърхностни налепи и микровключения в кухини и пукнатини показва, че дори при освободени златни частици, реалната им флотиремост може да бъде влошена, в резултат на повърхностни и вътрешни микроструктурни особености. Това обстоятелство подчертава важното значение на минераложките изследвания при интерпретацията на технологичното поведение на златото.

Заклучение

Проведените минераложки изследвания на технологичните продукти от досмилане и пречиствателна флотация на меднопорфирни руди позволяват да се формулират следните основни изводи:

1. Златото в изследваните продукти ПЗ и П1 присъства в самороден вид, като всички регистрирани частици са освободени. Размерите им варират от 10 x 20 до 250 x 150 μm, което ги отнася към групите на много дребно и дребно злато, съгласно класификацията на Петровская (1973).

2. Установено е неравномерно разпределение на среброто в част от изследваните златни частици и вътрешна фазова нееднородност, като по данни от EDX анализите се наблюдават случаи на преход от високопробно злато към електрум (Au, Ag) и обратно, както и наличие на почти еднородни частици с относително равномерно разпределение на среброто. Това показва вътрешна химична нееднородност на част от изследваните златинки.

3. Въпреки освободеността на златните частици, значителна част от тях съдържат микровключения от кварц, пирит и халкопирит, отложени в пори, микрокухини и пукнатини. Тези особености могат да затруднят

флотационното извличане на златото дори при освободени частици.

4. Рентгенодифрактометричният анализ потвърждава ясно изразено обогатяване с халкопирит на крайните пенни продукти, като в П9 съдържанието му достига до 79–84%, при едновременно намаляване на дела на скалообразуващите минерали.

5. Получените резултати показват, че за пълноценна оценка на технологичното поведение на златото при обогатяване на меднопорфирни руди е необходим комплексен подход, съчетаващ оптична микроскопия, рентгенодифрактометричен и SEM/EDX анализ.

Получените резултати потвърждават, че при оценката на технологичното поведение на златото при обогатяване на меднопорфирни руди, с детайлните минераложки и химични изследвания могат да бъдат изяснени причините за възможна загуба на злато в отпадъка.

Благодарности. Статията е в изпълнение на Проект BG05SFPR001-3.004-0002-C01 „Развитие и усъвършенстване на професионалното и интердисциплинарно образование в техническите и икономическите науки и повишаване на научноизследователския капацитет на добивната промишленост чрез проектна докторантура“, финансиран от програма „Образование“, съфинансирана от Европейския съюз.

Литература

Agorhom, E.A., Skinner, W., Zanin, M. (2013). Influence of gold mineralogy on its flotation recovery in a porphyry copper-gold ore. *Chemical Engineering Science*, 99, 127–138. <https://doi.org/10.1016/j.ces.2013.05.037>

- Allan, G.C., Woodcock J.T. (2001). A review of the flotation of native gold and electrum, *Minerals Engineering*, 14(9), 931–962. [https://doi.org/10.1016/S0892-6875\(01\)00103-0](https://doi.org/10.1016/S0892-6875(01)00103-0)
- Aird, H., Purcell, C., DeWitt, N., Matthews, J., Capurro, T., Claiborne, J., Bermudez, J., Meisel, Z. (2021). Gold-and silver-bearing assemblages in the Ann-Mason copper porphyry deposit, Yerington, Nevada, *Ore Geology Reviews*, 138, Article № 104339. <https://doi.org/10.1016/j.oregeorev.2021.104339>
- Blannin, R., Frenzel, M., Tuşa, L., Birtel, S., Ivăşcanu, P., Tim Baker, T., Gutzmer, J. (2021). Uncertainties in quantitative mineralogical studies using scanning electron microscope-based image analysis, *Minerals Engineering*, 167, Article № 106836. <https://doi.org/10.1016/j.mineng.2021.106836>
- Dominy, S., O'Connor, L., Glass, H., Purevgerel S., Xie, Y. (2018). Towards Representative Metallurgical Sampling and Gold Recovery Testwork Programmes, *Minerals*, 8(5), 193. <https://doi.org/10.3390/min8050193>
- Grigorova, M. (2020). Geophysical and mining technologies for increasing efficiency in Han Krum open pit mine, Bulgaria. 20th International Multidisciplinary Scientific GeoConference, 20(1.2), 111–118. Albena, Bulgaria.
- Несторов, Н., М. Петров, Т. Янкова, И. Григорова, Оценка на разпределението на златото и медта в технологични продукти от обогатяване на меднопорфирни руди, Год. на МГУ, т. 69 – 69^{та} Международна научна конференция, 16.11.2026, София, България.
- Петровская, Н. В. (1973). *Самородное золото*. Москва, Наука, 348.
- Tomova, M., Kisyov, A. (2025). Electrical resistivity tomography as a tool for geological-engineering assessment of the Benkovski-2 tailings storage facility. *The Eurasia Proceedings of Science, Technology, Engineering & Mathematics*, 38, 682–687.